

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Univerzitní studijní programy

Ověření parametrů pohonu kola pro vozidlo se systémem

IWD

Wheel Drive Parameters Validation of a IWD Vehicle

Student:

Bc. Lukáš Tacina

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Petr Chlebiš, CSc.

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Univerzitní studijní programy
Katedra elektroniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lukáš Tacina**
Studijní program: N3943 Mechatronika
Studijní obor: 3906T007 Automobilová elektronika
Téma: **Ověření parametrů pohonu kola pro vozidlo se systémem IWD**
Wheel Drive Parameters Validation of a IWD Vehicle

Zásady pro vypracování:

1. Analyzujte požadavky na trakční pohon vozidla se systémem IWD a navrhňte vhodné koncepční řešení.
2. Proveďte dimenzování trakčního pohonu pro experimentální vozidlo DEMOCAR a vyberte vhodné řešení.
3. Pohonnou jednotku ověřte v režimu individuálního pohonu jednoho kola a proveďte její nastavení pro aplikaci ve vozidle.
4. Proveďte zástavbu pohonu do vozidla a ověření vlastností pohonu.

Seznam doporučené odborné literatury:

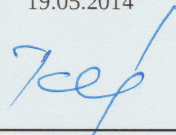
ROBERT BOSCH GmbH.: Automotive Handbook. Plochingen: Robert Bosch GmbH, 2007. 7th edition. 1192 str. ISBN 978-0-8367-1540-0
ERJAVEC, J.: Automotive Technology: A System Approach, 4th Edition, USA 2004, Thomson Learning, 1401 str. ISBN 1-4018-4831-1
KIENKE, K., NIELSEN, L.: Automotive Control Systems. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. 512 str. 2nd edition. ISBN 3-540-23139.
RAJAMANI, R.: Vehicle Dynamics and Control. London: Springer New York Dordrecht Heidelberg, 2012. 492 str. e-ISBN 978-1-4614-1433-9

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

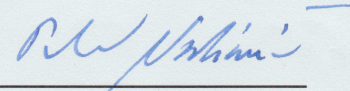
Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Petr Chlebiš, CSc.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Petr Noskivič, CSc.
prorektor pro studium



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci *Ověření parametrů pohonu kola pro vozidlo se systémem IWD* vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Petra Chlebiše, CSc. a uvedl v seznamu literatury všechny použité literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 19. Května 2014

vlastnoruční podpis autora

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....

Podpis:

Jméno a příjmení: Lukáš Tacina

Adresa: Návsí 581, p.s.č. 739 92

Abstrakt

Tacina, Lukáš: *Ověření parametrů pohonu kola pro vozidlo se systémem IWD*. [Diplomová práce]. VŠB-TU Ostrava. Vedoucí práce: prof. Ing. Petr Chlebiš, CSc. Ostrava, USP, 2014

Diplomová práce řeší teoretický rozbor a požadavky na elektrický pohon v kombinaci se systémem IWD. Na základě vstupní analýzy určuje, jaký typ elektromotoru je vhodnou alternativou pro pohon demonstračního vozidla „Democar“. Zaměřuje se na základní výpočty dynamických parametrů vozidla s použitými motory a popisuje možnosti řízení pohonu pomocí měničů. Ověřuje parametry pohonu jednoho kola v experimentu se spojenými hřídelemi dvou motorů. Uvádí také možnosti komunikace řídicí elektroniky měničů s nadřazenou řídicí jednotkou a v závěru práce je řešena zástavba pohonu do vozidla „Democar“.

Klíčová slova

Democar, synchronní motor, měnič, pohon IWD, alternativní pohon, elektromobil

Abstract

Tacina, Lukáš: *Wheel Drive Parameters Validation of a IWD Vehicle*. [Thesis]. VŠB-TU Ostrava. Leader of the thesis: prof. Ing. Petr Chlebiš, CSc., Ostrava, USP, 2014

This thesis addresses the theoretical analysis and the requirements of the electric drive system in combination with IWD. Based on the initial analysis determines what type of the electric motor is a good choice for a demonstration vehicle "DEMOCAR". It focuses on basic computing dynamic vehicle parameters with used engines and describes the drive control using inverters. Verifies the parameters of the drive with one wheel in experiment with the connected shafts of two motors. It also gives the possibility of the communications protocols control electronics converters with supervisory control unit and at the end of the work deals with the installation of the drive to the vehicle „DEMOCAR“.

Key words

DEMOCAR, synchronous motor, inverter, IWD drive, alternative drive, electric vehicle

Seznam značek a symbolů

1C1, 1D1 – svorky meziobvodu měniče
4WD – označení pohonu všech kol (four wheel drive)
4x4 – označení pohonu všech kol
AC – střídavý průběh elektrické energie
AI/AO – analogové vstupy a výstupy
AWD – označení pohonu všech kol (all wheel drive)
Ba+, Ba- – svorky pro chopper rezistor
CAN – Controller Area Network
CANOpen – CAN sběrnice určená pro průmysl
DC – stejnosměrný průběh elektrické energie
DI/DO – digitální vstupy a výstupy
ENC – enkoder fiction modul
IGBT - bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
IP – international protection (ochrana proti vniknutí vody a pevných částic do zařízení)
IWD – individuální pohon kola
Li-Fe-Po₄ – Lithium-Ferit-Fosfátový akumulátorový článěk
OPC – OLE for process control
PE – ochranný vodič
ProDrive – software pro konfiguraci měničů
PROFIBUS – standard průmyslové sběrnice
RS-232 – sériové komunikační rozhraní
SERCOS – serial real-time communication system
SMPM – synchronní motor s permanentními magnety
U, V, W – označení jednotlivých fází trojfázové sítě

a – zrychlení vozidla [ms^{-2}]
 c_x – součinitel odporu vzduchu [-]
f – součinitel valivého odporu [-]
 F_A – maximální možná síla pro zrychlení vozidla [N]
 F_K – síla na kole [N]
 $F_{k\max}$ - maximální možná síla na kole vozidla [N]
 f_r – jmenovitá frekvence [Hz]

f_x – součinitel valivého odporu pro rychlosti nad 50 kmh⁻¹ [-]
 G – tíha vozidla [N]
 g – gravitační zrychlení země [ms⁻²]
 I_o – klidový proud [A]
 I_{OMax} – maximální klidový proud [A]
 I_r – jmenovitý proud [A]
 J – moment setrvačnosti rotujících částí [kgm²]
 J_K – celkový moment setrvačnosti kol [kgm²]
 J_M – celkový moment setrvačnosti motorů [kgm²]
 k_{Tr} – momentová konstanta [NmA⁻¹]
 m – hmotnost [kg]
 M_{4M} – suma krouticích momentů všech motorů na vozidle [Nm]
 M_K – přepočítaný krouticí moment na kole [Nm]
 M_{Mmax} – maximální krouticí moment motoru [Nm]
 M_o – klidový krouticí moment [Nm]
 M_r – jmenovitý krouticí moment [Nm]
 M_Z – zatěžovací moment [Nm]
 n_K – otáčky kola [min⁻¹]
 n_M – otáčky motoru [min⁻¹]
 O_f – valivý odpor vozidla [N]
 O_{VZ} – vzdušný odpor [N]
 P_r – jmenovitý výkon [kW]
 r_K – poloměr kola vozidla [m]
 s – dráha [m]
 S_X – plocha čelního průmětu vozidla [m²]
 t – čas [s]
 U_{Bat+}, U_{Bat-} – napětí akumulátoru [V]
 v – rychlost vozidla [ms⁻¹, kmh⁻¹]
 α – úhel stoupání [°]
 δ – součinitel vlivu rotačních hmot [-]
 Δs – dílčí úsek dráhy [m]
 Δt – dílčí časový úsek [s]
 η_{mech} – mechanická účinnost [%]
 ρ_X – hustota vzduchu [kgm⁻³]

Obsah

Úvod.....	9
1. Analýza požadavků na pohon vozidla s IWD	10
1.1 Výběr vhodného typu elektromotoru pro systém IWD	10
1.2 Napájecí baterie	15
1.3 Řídicí elektronika pohonu	16
2. Dimenzování pohonu vozidla s IWD.....	17
2.1 Výpočet potřebné hnací síly na kolech vozidla.....	17
2.2 Výpočty doby a dráhy rozjezdu.....	23
2.3 Pohonná jednotka	25
2.3.1 Příprava měniče před uvedením do provozu.....	27
2.3.2 Komunikace měniče s okolním prostředím	28
3. Pohonná jednotka v režimu individuálního pohonu jednoho kola.....	30
3.1 Připojení motoru k měniči	30
3.2 Nastavení pohonu s programem ProDrive	31
3.3 Ověření parametrů pohonu	37
4. Zástavba motorů do demonstračního vozidla „DEMOCAR“	40
4.1 Nastavení měničů pro aplikaci ve vozidle „Democar“	41
5. Závěr	43
Seznam literatury	44
Seznam příloh.....	46
Přílohy	47

Úvod

S rostoucím počtem provozovaných vozidel se klade důraz na ekologii provozu. Vozidla poháněná benzínovými, či dieselvými motory jsou zdroji různých nebezpečných látek, které vznikají spalováním fosilních paliv, jimiž jsou emise škodlivých plynů, a to například oxidy dusíku, oxidy uhlíku a uhlovodíky opouštějící vozidlo skrze výfukovou soustavu, přímo do ovzduší.

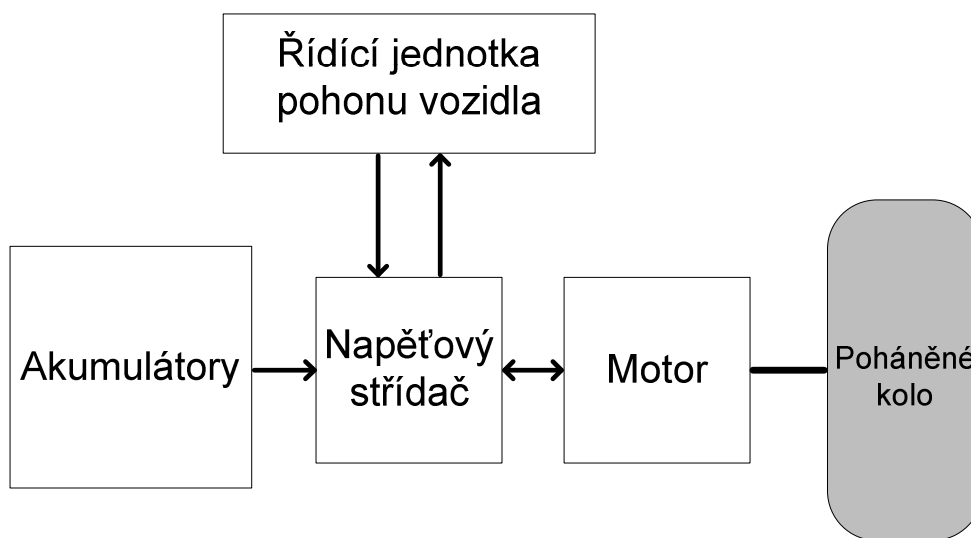
Alternativním zdrojem k pohonu automobilu je elektřina. Elektromobily jsou poháněny elektromotory a napájeny dobíjecími bateriemi. Účelem jejich zavádění do provozu je hlavně nulová produkce škodlivých emisí. Vozidla s elektrickým pohonem dokážou využít 59 – 62% energie elektřiny k jízdě. Vozidla se spalovacími motory využijí pouze 17 - 21% energie vzniklé spalováním benzínu či nafty. Elektrické motory poskytují tichý, plynulý chod a silnější akceleraci a jsou méně náročné na údržbu než konvenční spalovací systémy. Elektromobily však narážejí na několik nedostatků, zejména na nízký dojezd na jedno nabití 200 až 300 km a bateriové boxy, které mají vysokou hmotnost a jsou uloženy v podvozku vozidla. Doba nabíjení se pohybuje v rozsahu 4 až 8 hodin, existují však nabíjecí stanice s možností „quick charge“, které dokážou nabít 80% kapacity akumulátoru do 30 minut. Tato možnost má však na baterie nepříznivý vliv v podobě rychlého opotřebování článků. Jednou z posledních nevýhod je nutnost výměny baterií i několikrát za dobu životnosti vozidla. Nejčastěji používané Li-ion baterie jsou velmi drahé. Naproti všem nedostatkům elektromobilů je tato možnost pohonu schopná konkurovat stávajícím konvenčním systémům.

Tato diplomová práce si klade za cíl vybrat, dimenzovat a navrhnout zástavbu tohoto pohonu do podvozku demonstračního vozidla „Democar“.

1. Analýza požadavků na pohon vozidla s IWD

Dnešní automobily mohou být vybaveny pohonem jedné nápravy nebo pohonem 4x4 , 4WD anebo AWD. Uvedené pohony všech čtyř kol zlepšují trakční vlastnosti vozidla. Automobil je vybaven jedinou pohonnou jednotkou a krouticí moment je rozveden pomocí převodovek, spojek a poloos na hnaná kola. U těchto konvečních systémů je velmi obtížné řídit moment na každém kole individuálně, z důvodu mechanických vazeb a jednomu zdroji krouticího momentu.

Individuální pohon kol je využíván u elektromobilů, kde je každé hnané kolo vybaveno elektromotorem a měničem pro jeho řízení. Ten je napájen akumulátory uloženými v podvozku vozidla. Všechny měniče jsou propojeny s řídicí jednotkou, která zajišťuje rozložení točivého momentu na jednotlivá kola dle aktuální jízdní situace. Použití tohoto systému výrazně zlepšuje jízdní vlastnosti a stabilitu vozidla při jízdě.



Obr. 1: Blokové schéma pohonu IWD na jednom kole

1.1 Výběr vhodného typu elektromotoru pro systém IWD

Elektromotor je rotační stroj, který využívá silových účinků magnetického pole. Jedná se o působení dvou spřažených magnetických polí v magnetickém obvodu statoru a rotoru. Elektromotory, které mají dobré dynamické vlastnosti od nulových otáček, se používají jako trakční pohony. Dělí se na stejnosměrné a střídavé. Stejnosměrný motor patří koncepčně k nejstarším typům elektrických motorů. Využívá se především

v oblasti regulovaných pohonů, robotiky, mikroelektrických pohonů a jako pohon trakčních vozidel. Tento typ motoru lze použít jako motor nebo jako zdroj elektrické energie. Střídavé motory mají oproti stejnosměrným daleko širší uplatnění. S těmito motory se můžeme setkat v různých průmyslových odvětvích a také v trakčních vozidlech. Pokrývají širokou škálu výkonů od úrovně wattů až po řádově megawatty. Nabízí se i možnost jejich velmi přesného řízení a regulace pomocí měničů kmitočtů, nebo při akumulátorovém napájení ze střídačů.

Typy elektromotorů:

1) Stejnosměrný sériový motor

Tento motor má budící vinutí zapojené v sérii s vinutím kotvy. Při jeho zatěžování začnou klesat otáčky a stoupat krouticí moment. Nejčastěji se využívá u pohonů trakčních vozidel. Mezi jeho hlavní výhody patří velký rozběhový moment v nízkých otáčkách, jednoduchá změna směru otáčení motoru přepólováním a jednoduchá konstrukce. Jeho nevýhodami jsou klesající otáčky při rostoucí zátěži, velikost momentu, která je závislá na procházejícím proudu, nutnost zatížení při provozu a vznikající jiskření na komutátoru. Otáčky lze řídit pomocí změny napájecího napětí kotvy z řízeného usměrňovače nebo pulzního měniče. Používají se jako univerzální motory napájené AC nebo DC napětím a můžeme se s nimi setkat nejčastěji v trakci od pohonů tramvají po pohony lokomotiv. Dnes jsou ale nahrazeny motory s cizím buzením.

2) Stejnosměrný motor s cizím buzením

Budící vinutí je napájeno z jiného zdroje. Jeho výhodami jsou jednoduchá konstrukce, „tvrdá“ otáčková a momentová charakteristika a velký rozsah regulace otáček. Změna otáček se docílí změnou hodnoty napětí nebo velikostí budícího proudu. Je vhodný pro trakční vozidla. Hojně se využívá u obráběcích strojů nebo jiných servopohonů.

3) Stejnosměrný motor s permanentními magnety

Konstantní pole motoru s cizím buzením je nahrazeno magnetickým polem permanentních magnetů. Změna směru otáčení lze snadno docílit změnou polarity kotvy. DC motory s permanentními magnety se nejčastěji využívají jako servopohony.

4) Střídavý motor asynchronní

Tato koncepce elektromotoru má nejčastěji ve statoru trojfázové vinutí, které je připojeno k trojfázovému zdroji elektrické energie. Vinutí je složeno ze tří cívek, které jsou vůči sobě pootočený o 120° . Vlivem působení dvou nebo několika střídavých magnetických polí vzniká točivé magnetické pole, které vytváří tažnou sílu motoru. Magnetické pole rotuje se synchronními otáčkami ω_s , která závisí na frekvenci napájecího proudu. Motor vychází z jednoduché konstrukce a je téměř bezúdržbový. Při nízkých otáčkách disponuje malým točivým momentem. Pro řízení asynchronního motoru je vhodný frekvenční měnič. Jedná se o nejčastěji využívaný typ elektrického pohonu.

5) Střídavý motor synchronní

Statorový magnetický obvod je tvořen dynamo plechy s drážkami, ve kterých je nejčastěji uloženo trojfázové vinutí. Rotor se skládá ze skupiny pólů nebo permanentních magnetů a lze ho ještě dělit na hladký nebo s vyniklými póly. Otáčky rotoru jsou přímo úměrné frekvenci napájecího napětí a počtu pólových dvojic. Rotor se tedy otáčí stejnými otáčkami, jak je buzeno magnetické pole statoru. Při zatížení vzniká skluz, který nesmí přesáhnout hodnotu 90° , jinak dojde k „utržení“ rotoru.

Od nulových otáček je schopen dodat maximální krouticí moment na hřídel. S použitím frekvenčního měniče se dá řídit v širokém rozsahu otáček. Při změně zatížení na hřídeli se snaží udržet konstantní otáčky. Používají se k pohonům výtahů, jako trakční pohony, v případě SMPM je lze použít jako pohony elektromobilů a hybridních vozidel.

6) Reluktanční motor

Rotor je navržen tak, že v jedné ose má vysoký magnetický odpor a v ose druhé nízký magnetický odpor. Krouticí moment vzniká díky změně reluktance neboli magnetického odporu. Jedná se o odpor, který klade materiál procházejícímu magnetickému toku. Po spuštění motoru se nabudí točivé magnetické pole ve statoru a rotor má tendenci se k němu natočit osou s nízkou hodnotou reluktance. Tento typ motoru má jednoduchou konstrukci a disponuje vysokým záběrovým momentem. Jeho jedinou nevýhodou je kolísání točivého momentu při nízkých otáčkách a s tím i spojený hluk od motoru. K jeho řízení je nutné použít speciální měnič. Lze jimi nahradit asynchronní motory a dají se použít pro pohon elektromobilu.

Volba vhodného typu pohonu pro vozidlo se systémem IWD

U vozidel s elektrickým pohonem je při jízdě vyžadován dostatečně velký krouticí moment na kola v celém jeho pracovním rozsahu otáček. V tomto případě je vhodné použít synchronní motor.

Ze všech výše uvedených typů elektrických pohonů je pro naše demonstrační vozidlo „Democar“ nejvhodnějším kandidátem střídavý synchronní motor s permanentními magnety řízený frekvenčním měničem.

Synchronní elektromotor s permanentními magnety

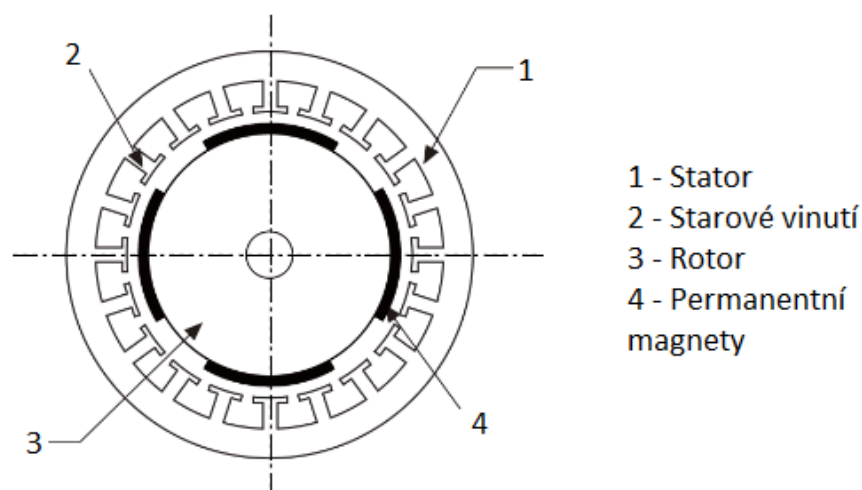
Synchronní elektromotory s permanentními magnety jsou velmi rozšířené zejména v oblasti průmyslových servopohonů. Lze se s nimi setkat i v zařízeních elektrické trakce a pohonů silničních vozidel. Nejčastěji se vyskytují dvě základní provedení:

- 1) Klasická koncepce: Motor s rotorem v dutině statoru
- 2) Speciální koncepce: Motor s pevně uchyceným statorem a vnějším rotorem

Ad 1) Motor s rotorem v dutině statoru

Zejména z důvodu vysoké účinnosti se v současnosti začínají prosazovat také pohony s permanentními magnety v rotoru. Synchronní motor s permanentními magnety, zkráceně SMPM, disponuje vyšší účinností než motor indukční, neboť jeho buzení nemusí motor vytvářet prostřednictvím indukční vazby rotorového vinutí. Použité permanentní magnety vytvářejí statické magnetické pole. Tím také klesají ztráty ve vinutí jak rotoru, tak částečně i statoru.

Toto řešení motoru je dnes standardem v oblasti střídavých servopohonů, vykazuje velký záběrový moment od nulových otáček a řadu dalších výhodných vlastností. Pro demonstrační vozidlo byl proto vybrán synchronní trojfázový motor od společnosti Baumüller, který je možno pořídit i s vhodným měničem.



Obr. 2: Konstrukční uspořádání motoru s permanentními magnety

Ad 2) Motor s pevně uchycený stator a vnějším rotorem

Komerčně by se v automobilovém průmyslu tato koncepce mohla objevit velice brzy. Montáž tohoto motoru je provedena přímo do kola automobilu. Jeho stator je pevně spojen s karoserií vozu a k rotoru je upevněno kolo. Dvě nebo všechna čtyři kola vozidla jsou vybavena vlastním motorem. Tento elektromotor může být využíván i v kombinaci se spalovacím motorem, s jeho použitím proto můžeme uvažovat jak u hybridních, tak u čistě elektrických vozidel. Montáží v kole se vytvoří místo pro akumulátory v karoserii, odpadají mechanické odpory kloubových vazeb hnací hřídele a kola vozu. Nejmodernější motory tohoto typu nyní disponují výkonem přibližně 62 kW. Lze však krátkodobě využít „boost“ režim do výkonu až 82 kW. Rotor je pak zpravidla tvořen neodymovými magnety.

Výhody:

- Vyšší účinnost pohonu
- Výrazné zjednodušení mechanické konstrukce pohonu
- Využití rekuperace při brzdění pro dobíjení akumulátoru

Nevýhody:

- Vyžaduje velmi dobré chlazení
- Vysoký požadavek na IPxx (odolnost vůči prachu a vlhkosti)
- Velká neodpružená hmotnost

Zatím je i přes některé nedostatky tohoto pohonu toto řešení velmi zajímavé. Je však zapotřebí ještě další vývoj, pro snížení velmi vysoké neodpružené hmotnosti pohonu. Na obr. 3 je vyobrazeno jedno z řešení od firmy Protean Electric.



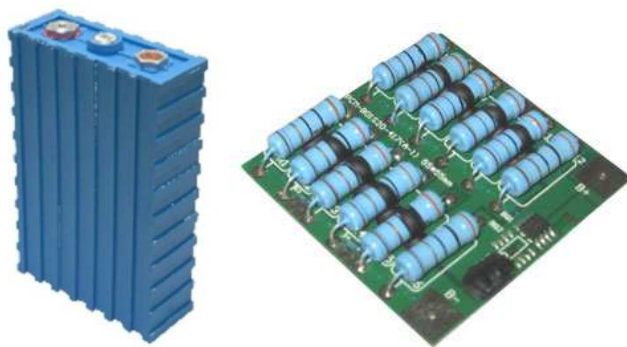
Obr. 3: Koncepce elektrického pohonu v kole od společnosti Protean Electric

1.2 Napájecí baterie

Pro napájení byla zvolena sestava článků Li-Fe-Po₄. Jedná se o technologii, která byla vyvinuta v roce 1996. Vychází z konstrukce lithiových článků a svými vlastnostmi je vhodná právě pro napájení pohonů elektromobilů a hybridních automobilů. Tyto články mají energetickou hustotu 220 Wh na 1 kg hmotnosti. Jejich životnost se odhaduje na více než 10 let a zvládnou 2000 – 7000 nabíjecích cyklů.

- | | |
|-----------|---|
| Výhody: | <ul style="list-style-type: none"> - odolnost vůči teplotním vlivům - dodává vysoký proud i při špičkových odběrech - pomalé stárnutí článků |
| Nevýhody: | <ul style="list-style-type: none"> - není doporučeno rychlé nabíjení (zkracuje životnost) - v případě častého hlubokého vybití dochází k selhání článků |

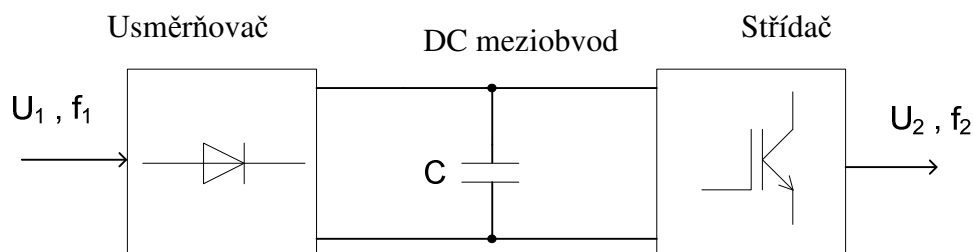
Vozidlo „Democar“ je vybaveno bateriovým boxem, který se skládá z 200 ks Li-Fe-Po₄ článků. Každý článek má nominální hodnotu napětí 3,3 V a je k němu připojen balancer. Hlavní funkcí balancerů je zajištění rovnoměrného rozložení napětí na řetězci akumulátoru. Na obr. 4 je zobrazen použitý Li-Fe-Po₄ článek s balanční jednotkou.



Obr. 4: Li-Fe-Po₄ článek s balanční jednotkou

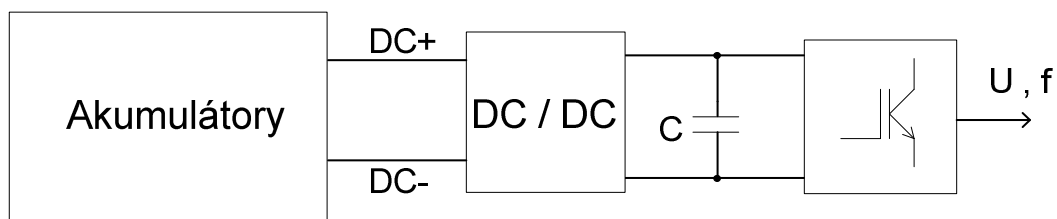
1.3 Řídicí elektronika pohonu

Pro řízení SMPM se standardně používá nepřímý měnič kmitočtu. Skládá se ze tří částí. Vstupní část je tvořena diodovým usměrňovačem, následuje stejnosměrný meziobvod a posledním blokem je střídač s IGBT tranzistory. Výstupní napětí je řízeno pomocí pulzní šířkové modulace. Základní schéma měniče je zobrazeno na obr. 5.



Obr. 5: Blokové schéma nepřímého měniče kmitočtu

Při aplikaci tohoto řízení pohonu do elektromobilu je vstupní usměrňovač eliminován a napájení z akumulátorů je přivedeno přímo na svorky meziobvodu. Pro řízení SMPM je pak používána pouze část s obvodem střídače.



Obr. 6: Napájení měniče z akumulátorů

Některé měniče jsou vybaveny ochranou proti nepřítomnosti vstupního střídavého napětí. Eliminace této ochrany je popsána a vyřešena v kapitole 4.1. Akumulátory nemohou být připojeny přímo na meziobvod měniče. Pro řízení toku elektrické energie z akumulátoru do pohonu je do obvodu zařazen DC/DC měnič, který lze také využít pro nabíjení baterií při rekuperaci.

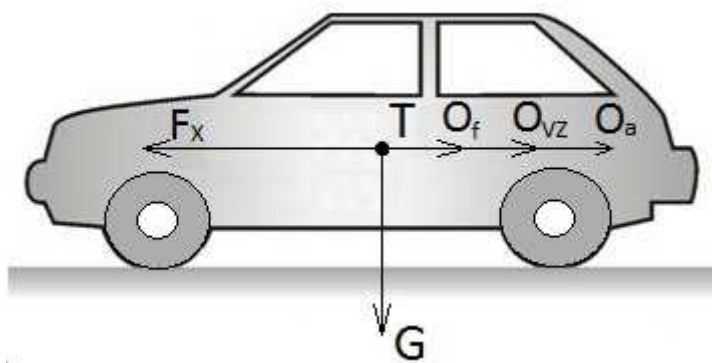
[1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9]

2. Dimenzování pohonu vozidla s IWD

Základní výpočty silových poměrů vozidla je nutné provést na základě vztahů známých z dynamiky vozidel.

2.1 Výpočet potřebné hnací síly na kolech vozidla

Hnací síla na kole je součtem jízdních odporů, které působí proti pohybu vozidla. V prvním kroku byla stanovena jeho přibližná hmotnost na hodnotu 480 kg. Dalšími předpoklady pro výpočet vlastností je, že pohyb vozidla po vodorovné podložce. Síla pro pohyb vozidla vpřed musí překonat odpor valivý, vzdušný při jízdě konstantní rychlostí a setrvačný odpor při zrychlování.



Obr. 7: Jízdní odpory působící proti pohybu vozidla.

F_X – hnací síla v podélném směru

G – tíha vozidla

O_f – odpor valení

O_{vz} – vzdušný odpor

O_a – odpor proti zrychlení

Výpočet hnací síly na kole vozidla:

$$F_K = O_f + O_s + O_{vz} [N] \quad (2.10)$$

Výpočet valivého odporu vozidla:

$$O_f = m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha [N] \quad (2.11)$$

Výpočet odporu stoupání vozidla:

$$O_s = m \cdot g \cdot \sin \alpha [N] \quad (2.12)$$

Výpočet vzdušného odporu vozidla:

$$O_{vz} = \frac{1}{2} \cdot c_x \cdot \rho_x \cdot S_x \cdot v^2 [N] \quad (2.13)$$

Výpočet momentu na kole vozidla:

$$M_k = \frac{F_k \cdot r_k}{\eta_{mech}} [Nm] \quad (2.14)$$

Výpočet otáček kola:

$$n_K = \frac{60 \cdot v}{2 \cdot \pi \cdot r_K} [min^{-1}] \quad (2.15)$$

Vypočet maximální síly na kole:

$$F_{kmax} = \frac{M_{Mmax}}{r_k} [N] \quad (2.16)$$

Výpočet zbytkové síly pro zrychlení:

$$F_A = F_{kmax} - O_f - O_{vz} [N] \quad (2.17)$$

Výpočet součinitele rotačních hmot:

$$\delta = 1 + \left(\frac{\sum J_M + \sum J_k}{m \cdot r_k^2} \right) [-] \quad (2.18)$$

Výpočet zrychlení:

$$a = \frac{F_A}{m \cdot \delta} [ms^{-2}] \quad (2.19)$$

Ze získané hodnoty hnací síly na kole se vypočítá potřebný krouticí moment na kole dle vztahu uvedeného v rovnici 2.14.

Dle měření a odhadu byly na základě rozměrů vozidla „DEMOCAR“ stanoveny tyto vstupní parametry výpočtu:

$$m = 480 \text{ kg}; g = 9,81 \text{ ms}^{-2}; c_x = 0,6; S_x = 1,152 \text{ m}^2; \alpha = 0^\circ; \rho_x = 1,25 \text{ kgm}^{-3}; f = 0,012; r_k = 0,279 \text{ m}; \eta_{mech} = 100\%$$

Při rychlostech nad 50 kmh^{-1} se součinitel smykového tření f mění dle vztahu 2.20.

$$f_X = f \cdot [1 + 0,0065 \cdot (v - 50)] [-] \quad (2.20)$$

Pro výpočty je uvažováno s maximální rychlostí $v = 60 \text{ kmh}^{-1}$

Výpočet potřebné hnací síly vozidla při maximální rychlosti:

$$v = 60 \text{ kmh}^{-1} \rightarrow v = 16,67 \text{ ms}^{-1}$$

$$O_f = 480 \cdot 9,81 \cdot 0,012 \cdot \cos(0^\circ) = 56,51 \text{ N}$$

$$O_{VZ} = \frac{1}{2} \cdot 0,6 \cdot 1,25 \cdot 1,152 \cdot 16,67^2 = 120,05 \text{ N}$$

$$F_K = 56,51 + 120,05 = 176,56 \text{ N}$$

$$M_K = 176,56 \cdot 0,279 = 49,26 \text{ Nm}$$

$$n_K = \frac{60 \cdot 16,67}{2 \cdot \pi \cdot 0,279} = 570,56 \text{ min}^{-1}$$

Na základě výše uvedeného výpočtu byl vybrán typ motoru DSC100-S64U s parametry uvedenými v tabulce č. 1.

Tabulka 1: Parametry zvoleného motoru

$n_M [\text{min}^{-1}]$	$M_o [\text{Nm}]$	$I_o [\text{A}]$	$M_{o,\max} [\text{Nm}]$	$I_{o,\max} [\text{A}]$	$P_r [\text{kW}]$
1000	43,2	9,9	84	22,6	4,2
$M_r [\text{Nm}]$	$I_r [\text{A}]$	$k_{Tr} [\text{NmA}^{-1}]$	$f_r [\text{Hz}]$	$J [\text{kgcm}^2]$	$m [\text{kg}]$
40,5	9,2	4,4	83,3	73,5	30

Vzorový výpočet při $n_k = 150 \text{ min}^{-1}$:

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_k \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,279 \cdot 150}{60} = 4,38 \text{ ms}^{-1}$$

$$O_f = 480 \cdot 9,81 \cdot 0,012 \cdot \cos(0^\circ) = 56,51 \text{ N}$$

$$O_s = 480 \cdot 9,81 \cdot \sin(0^\circ) = 0 \text{ N}$$

$$O_{VZ} = \frac{1}{2} \cdot 0,6 \cdot 1,25 \cdot 1,152 \cdot 4,38^2 = 8,29 \text{ N}$$

$$F_K = 56,51 + 0 + 8,3 = 64,81 \text{ N}$$

$$M_K = F_K \cdot r_K = 64,81 \cdot 0,279 = 18,08 \text{ Nm}$$

Předpoklad je, že $M_{4M} = 4M_{Mmax} = 160 \text{ Nm}$

$$F_{kmax} = \frac{160}{0,279} = 573,48 \text{ N}$$

$$F_A = 573,48 - 56,51 - 8,29 = 508,68 \text{ N}$$

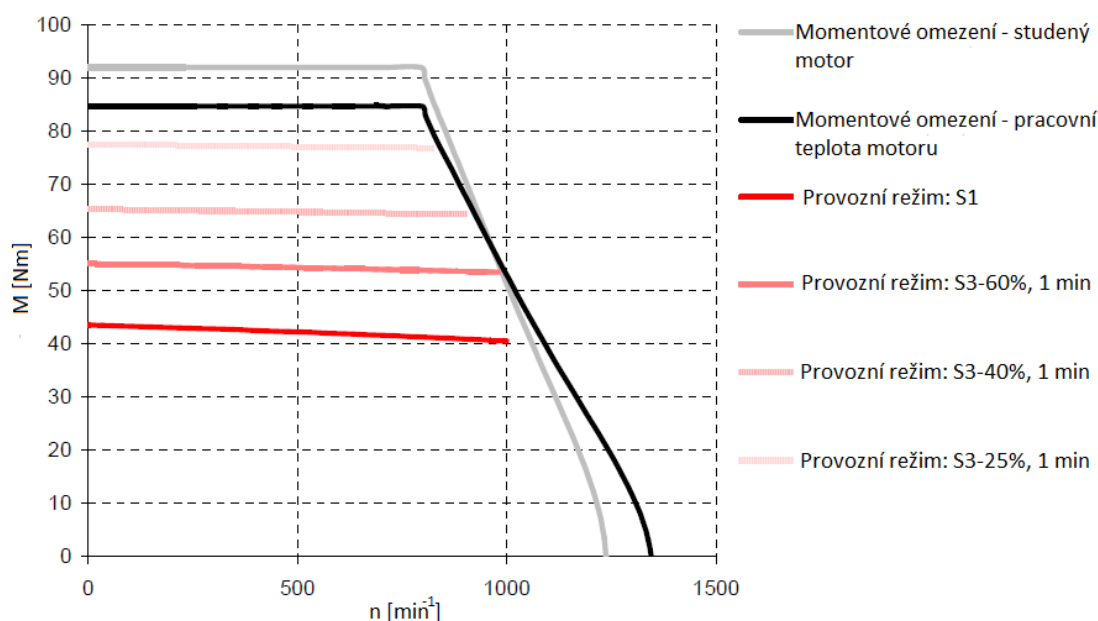
$$\delta = 1 + \left(\frac{4 \cdot 0,00753 + 4 \cdot 1}{480 \cdot 0,279^2} \right) = 1,1$$

$$a = \frac{F_A}{m \cdot \delta} = \frac{508,68}{480 \cdot 1,1} = 0,96 \text{ ms}^{-1}$$

Ve výše uvedeném vzorovém výpočtu má vozidlo konstantní rychlost $v = 4,38 \text{ ms}^{-1}$ a zbytkovou sílu pro zrychlení $F_A = 508,68 \text{ N}$. Pro výpočet aktuální hodnoty zrychlení byla použita rovnice 2.19. V tabulce 2 jsou uvedeny vypočítané hodnoty veličin působících na pohybující se vozidlo v celém rozsahu otáček motoru.

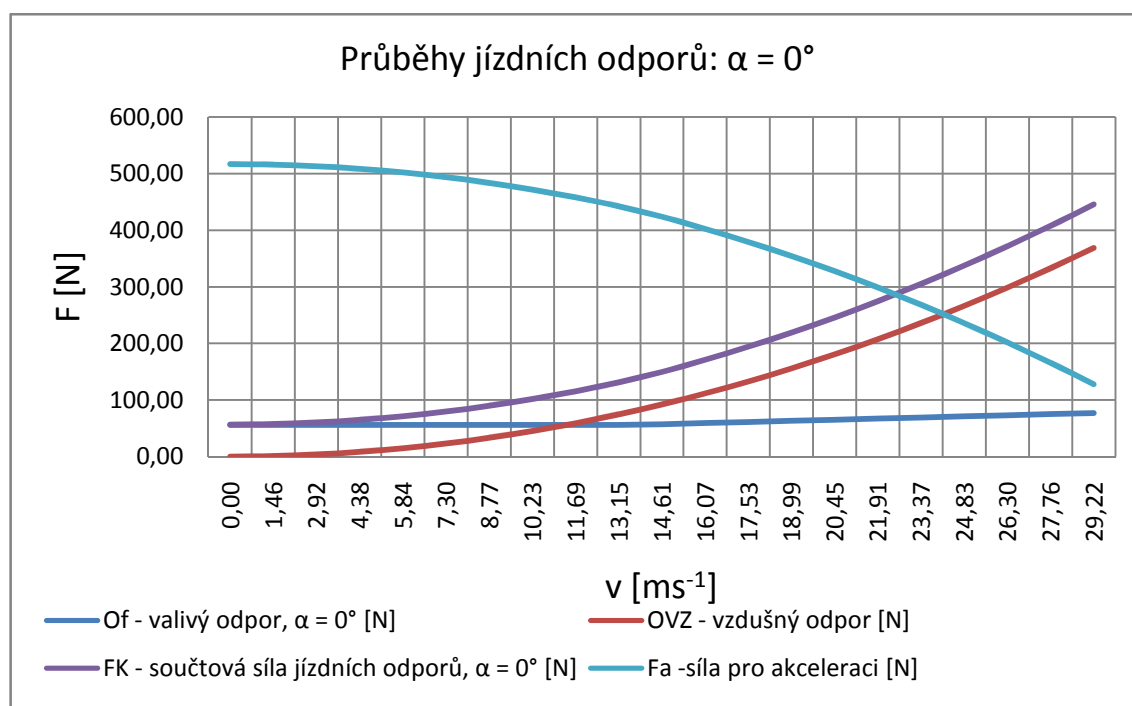
Tabulka 2: Hodnoty jízdních odporů a hnací síly na kolech při různých rychlostech vozidla

n_m [min ⁻¹]	v [ms ⁻¹]	v [kmh ⁻¹]	f [-]	O_f [N]	O_{vz} [N]	F_{kmax} [N]	F_a [N]	a [ms ⁻²]	F_K [N]	M_K [Nm]
0	0,00	0,00	0,012	56,51	0,00	573,48	516,97	0,98	56,51	15,77
50	1,46	5,26	0,012	56,51	0,92	573,48	516,05	0,98	57,43	16,02
100	2,92	10,52	0,012	56,51	3,69	573,48	513,29	0,97	60,19	16,79
150	4,38	15,78	0,012	56,51	8,30	573,48	508,68	0,96	64,80	18,08
200	5,84	21,04	0,012	56,51	14,75	573,48	502,22	0,95	71,26	19,88
250	7,30	26,30	0,012	56,51	23,05	573,48	493,93	0,94	79,55	22,20
300	8,77	31,55	0,012	56,51	33,19	573,48	483,79	0,92	89,69	25,02
350	10,23	36,81	0,012	56,51	45,17	573,48	471,80	0,89	101,68	28,37
400	11,69	42,07	0,012	56,51	59,00	573,48	457,97	0,87	115,51	32,23
450	13,15	47,33	0,012	56,51	74,67	573,48	442,30	0,84	131,18	36,60
500	14,61	52,59	0,012	57,46	92,19	573,48	423,83	0,80	149,65	41,75
550	16,07	57,85	0,013	59,39	111,55	573,48	402,54	0,76	170,94	47,69
600	17,53	63,11	0,013	61,32	132,76	573,48	379,40	0,72	194,08	54,15
650	18,99	68,37	0,013	63,25	155,80	573,48	354,43	0,67	219,05	61,12
700	20,45	73,63	0,014	65,18	180,69	573,48	327,60	0,62	245,88	68,60
750	21,91	78,89	0,014	67,11	207,43	573,48	298,94	0,57	274,54	76,60
800	23,37	84,14	0,015	69,05	236,01	573,48	268,42	0,51	305,06	85,11
850	24,83	89,40	0,015	70,98	266,43	573,48	236,07	0,45	337,41	94,14
900	26,30	94,66	0,015	72,91	298,70	573,48	201,87	0,38	371,61	103,68
950	27,76	99,92	0,016	74,84	332,81	573,48	165,83	0,31	407,65	113,73
1000	29,22	105,18	0,016	76,77	368,76	573,48	127,94	0,24	445,54	124,30

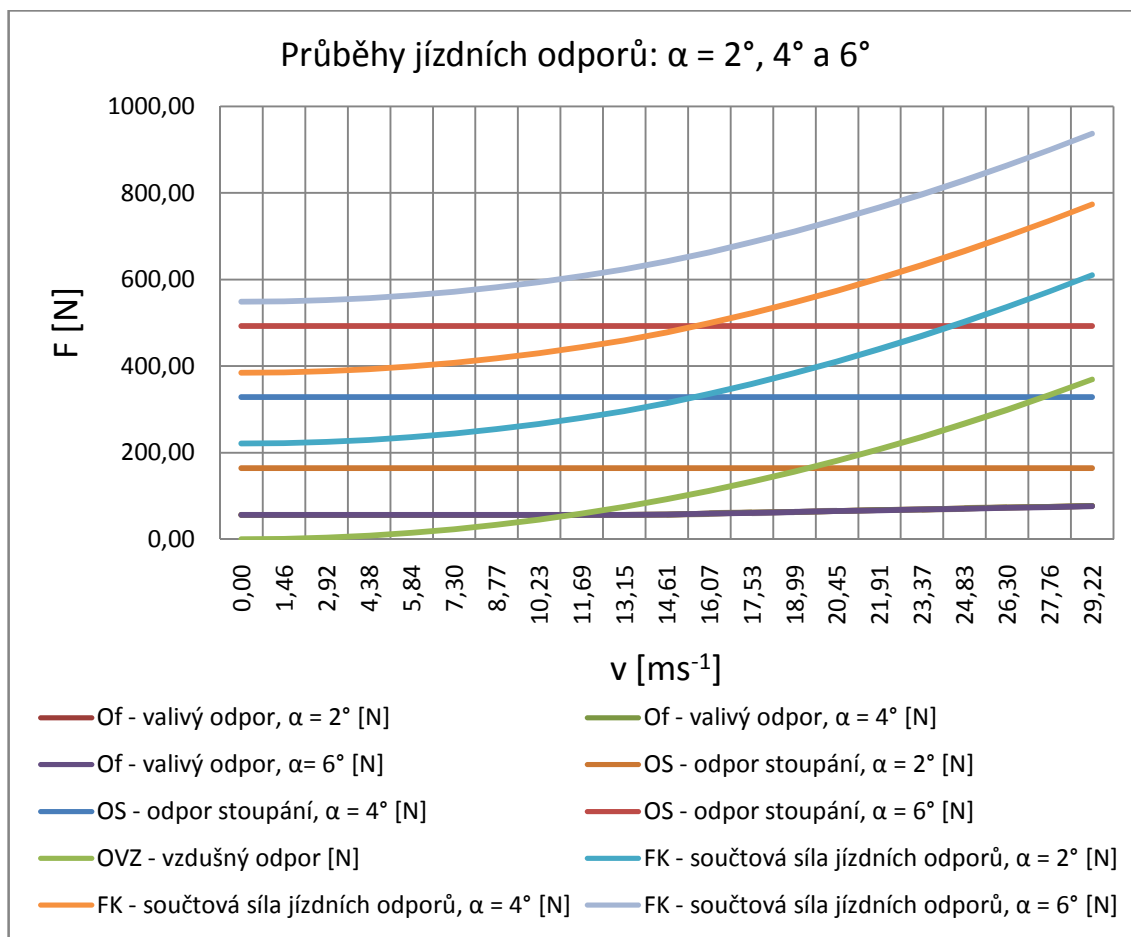


Obr. 8: Momentová charakteristika motoru DSC100S64U10-5 v provozních režimech S1 a S3

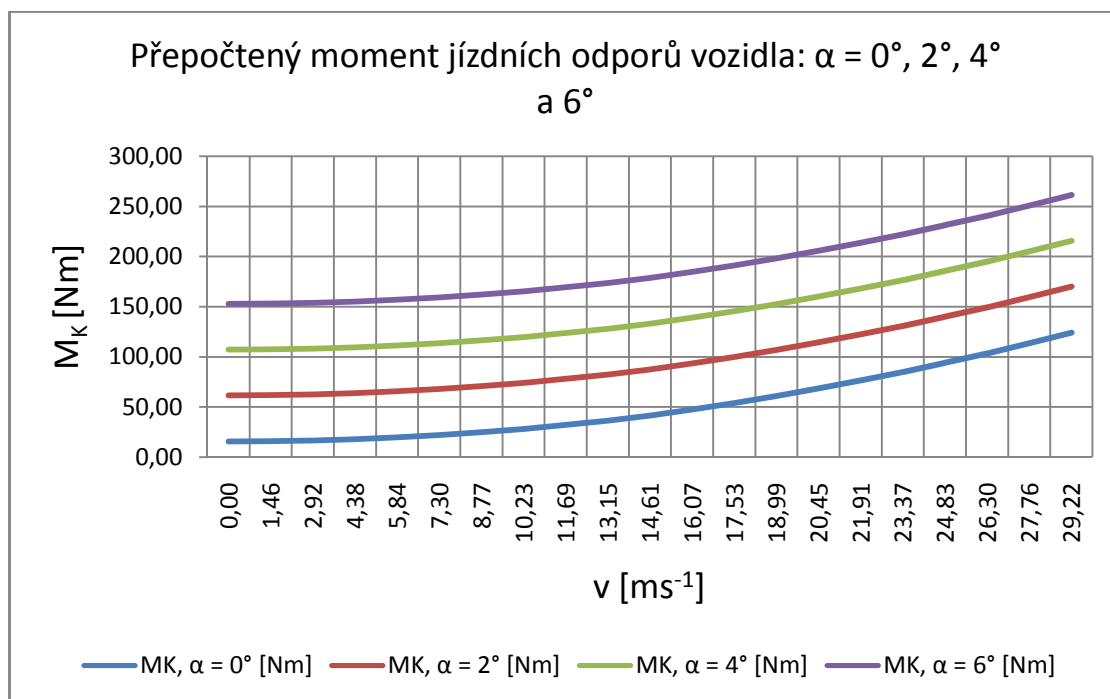
Graf na obr. 9 znázorňuje síly působící na vozidlo při jízdě po vodorovné rovině. Obr. 10 vyobrazuje několik průběhů působících sil dle úhlu stoupání vozovky a na obr. 11 jsou znázorněny momenty potřebné k pohybu vozidla při stoupání v rozsahu 0 – 6°. Data k obr. 10 a 11 jsou uvedena v příloze 1 a v příloze 2.



Obr. 9: Průběh jízdních odporů a hnací síly na kolech v závislosti na otáčkách



Obr. 10: Průběhy součtových sil jízdních odporů v závislosti na úhlu stoupání



Obr. 11: Průběhy přepočtených točivých momentů v závislosti na úhlu stoupání

K zachování určité dynamiky vozidla bude hodnota krouticího momentu omezena na 80 Nm z celkových 160 Nm . Ponechá se tak 80 Nm k provádění dynamických testů vozidla. Z tabulky 2 vychází, že vozidlo tohoto momentu na kole dosáhne při rychlosti 80 kmh^{-1} . Z bezpečnostních důvodů bude rychlost softwarově omezena do 50 kmh^{-1} .

2.2 Výpočty doby a dráhy rozjezdu

Př.: Výpočet doby rozjezdu z $v = 0$ na $2,92 \text{ ms}^{-1}$:

$$\Delta t = (v_n - v_{n-1}) \cdot a_n^{-1} + (v_n - v_{n-1}) \cdot \left(\frac{a_{n-1}^{-1} - a_n^{-1}}{2} \right) [s] \quad (2.21)$$

$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_n [s] \quad (2.22)$$

$$\Delta t_1 = (1,46 - 0) \cdot 0,98^{-1} + (1,46 - 0) \cdot \left(\frac{0,98^{-1} - 0,98^{-1}}{2} \right) = 1,49 \text{ s}$$

$$\Delta t_2 = \dots = 1,50 \text{ s}$$

$$t = 0 + 1,49 + 1,5 = 2,99 \text{ s}$$

Výpočet dráhy, kterou vozidlo teoreticky ujede při zrychlování z $v = 0$ na $2,92 \text{ ms}^{-1}$:

$$\Delta s = (t_n - t_{n-1}) \cdot v_n + (t_n - t_{n-1}) \cdot \left(\frac{v_n - v_{n-1}}{2} \right) [m] \quad (2.23)$$

$$s = \sum_{i=1}^n \Delta s_n [m] \quad (2.24)$$

$$\Delta s_1 = (1,49 - 0) \cdot 1,46 + (1,49 - 0) \cdot \left(\frac{1,46 - 0}{2} \right) = 3,26 \text{ m}$$

$$\Delta s_2 = \dots = 5,48 \text{ m}$$

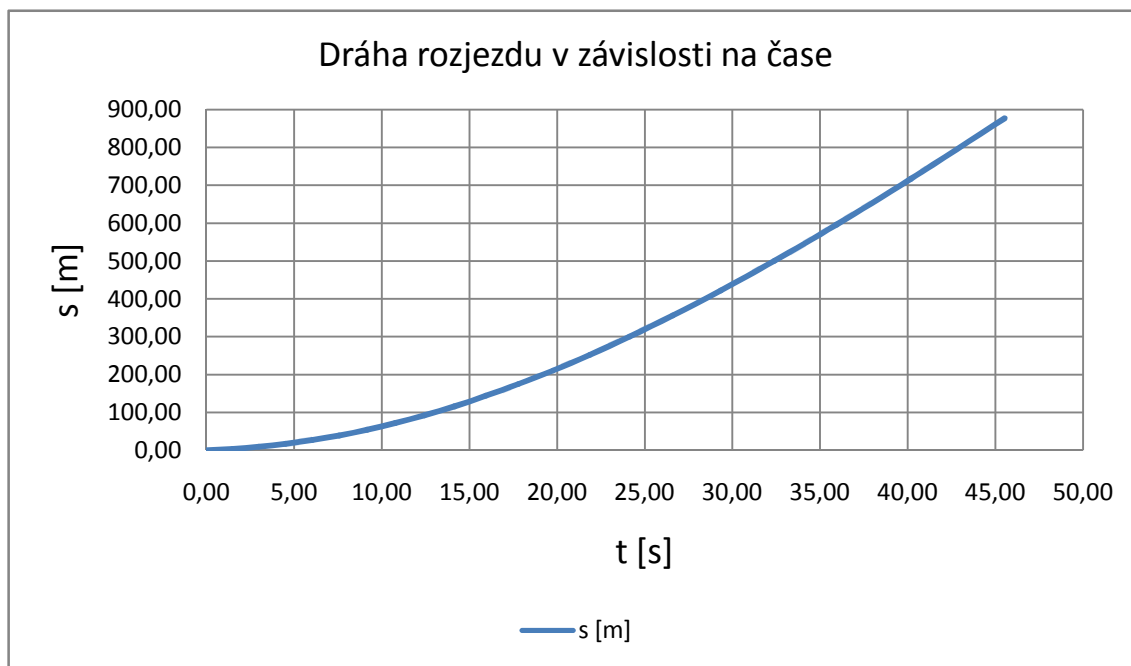
$$s = 0 + 3,26 + 5,48 = 8,74 \text{ m}$$

Tabulka 3: Výpočet celkové doby a dráhy při zrychlování vozidla z rychlosti

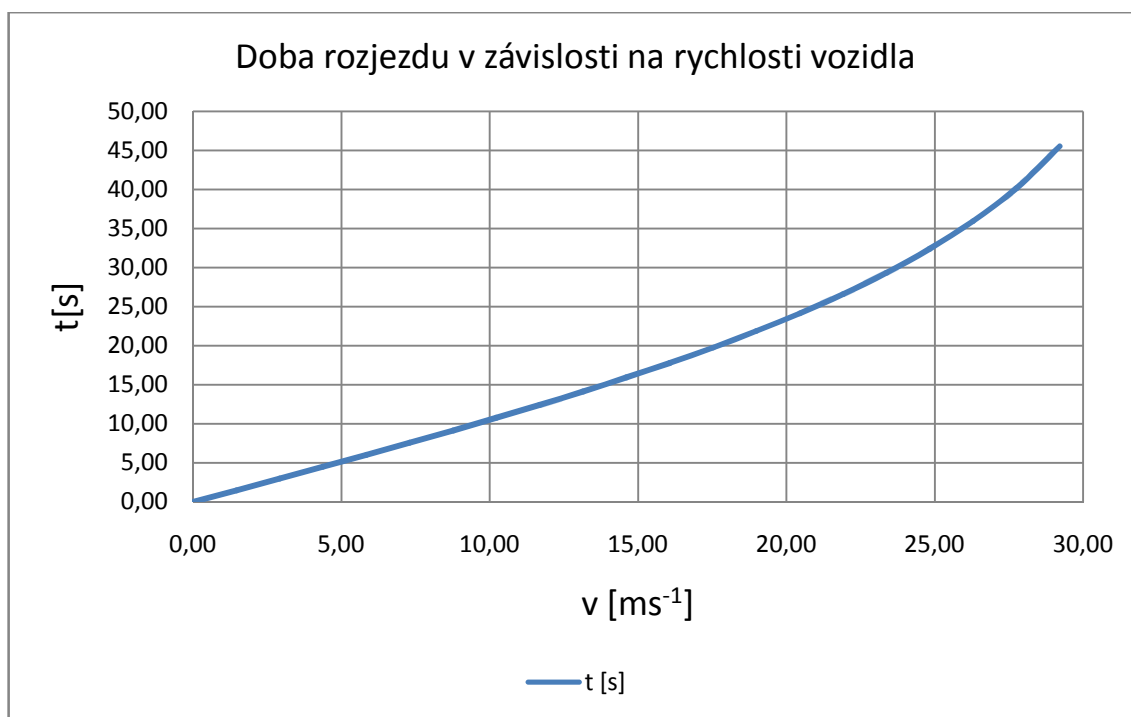
$$v = 0 \text{ ms}^{-1} \text{ na rychlost } v = 29,22 \text{ ms}^{-1}$$

$n_M = n_K [\text{min}^{-1}]$	$v [\text{ms}^{-1}]$	$v [\text{kmh}^{-1}]$	$a [\text{ms}^{-2}]$	$\Delta t [\text{s}]$	$\Delta s [\text{m}]$	$t [\text{s}]$	$s [\text{m}]$
0	0,00	0,00	0,98	0,00	0,00	0,00	0,00
50	1,46	5,26	0,98	1,49	3,27	1,49	3,27
100	2,92	10,52	0,97	1,50	5,47	2,99	8,75
150	4,38	15,78	0,96	1,51	7,72	4,50	16,46
200	5,84	21,04	0,95	1,53	10,03	6,03	26,50
250	7,30	26,30	0,94	1,55	12,44	7,58	38,94
300	8,77	31,55	0,92	1,58	14,98	9,15	53,92
350	10,23	36,81	0,89	1,61	17,69	10,77	71,61
400	11,69	42,07	0,87	1,66	20,61	12,43	92,22
450	13,15	47,33	0,84	1,71	23,79	14,14	116,01
500	14,61	52,59	0,80	1,78	27,33	15,92	143,34
550	16,07	57,85	0,76	1,87	31,38	17,79	174,72
600	17,53	63,11	0,72	1,97	36,06	19,77	210,78
650	18,99	68,37	0,67	2,10	41,51	21,87	252,28
700	20,45	73,63	0,62	2,27	47,99	24,14	300,27
750	21,91	78,89	0,57	2,47	55,87	26,60	356,14
800	23,37	84,14	0,51	2,73	65,73	29,33	421,87
850	24,83	89,40	0,45	3,07	78,49	32,40	500,36
900	26,30	94,66	0,38	3,54	95,78	35,95	596,14
950	27,76	99,92	0,31	4,24	120,67	40,18	716,81
1000	29,22	105,18	0,24	5,34	159,92	45,52	876,73

V tabulce 3 jsou uvedeny doby a dráhy rozjezdu vozidla „Democar“ v rozsahu rychlostí od 0 ms^{-1} do $29,22 \text{ ms}^{-1}$, což odpovídá otáčkám motoru 0 až 1000 min^{-1} .



Obr. 12: Rozjezdová charakteristika

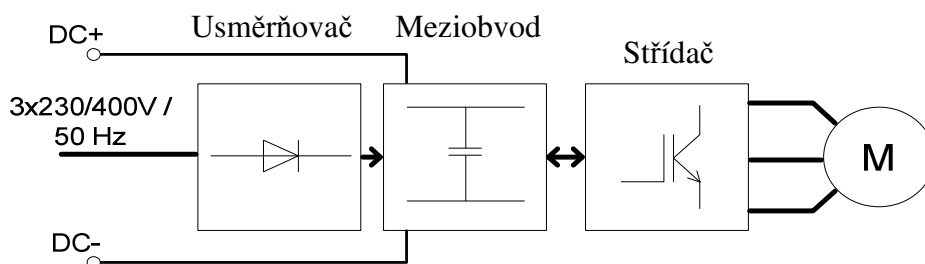


Obr. 13: Doba rozjezdu vozidla v závislosti na rychlosti

2.3 Pohonná jednotka

Vozidlo „Democar“ je vybaveno motory od společnosti Baumüller, typové označení DSC100-S64U. Jedná se o 10-ti pólové, trojfázové synchronní motory s permanentními magnety. Jejich základní parametry jsou uvedeny v tabulce 1.

Řízení pohonu zajišťuje měnič od společnosti Baumüller s označením b maXX 4400 typ: b maXX 4423-ST0-01200-03. Základní parametry se nachází v tabulce 4. V dodávaném provedení je měnič koncipován jako měnič kmitočtu, v aplikaci na vozidle bude využíván pouze jako střídač. Měnič je tvořen třemi základními bloky, kterými jsou: 6-ti pulzní diodový usměrňovač, napěťový meziobvod s vývody a střídač. Napěťový meziobvod tohoto měniče má vyvedeny svorky DC+ a DC-, které jsou důležité pro jeho napájení z akumulátoru. Viz obr. 14.



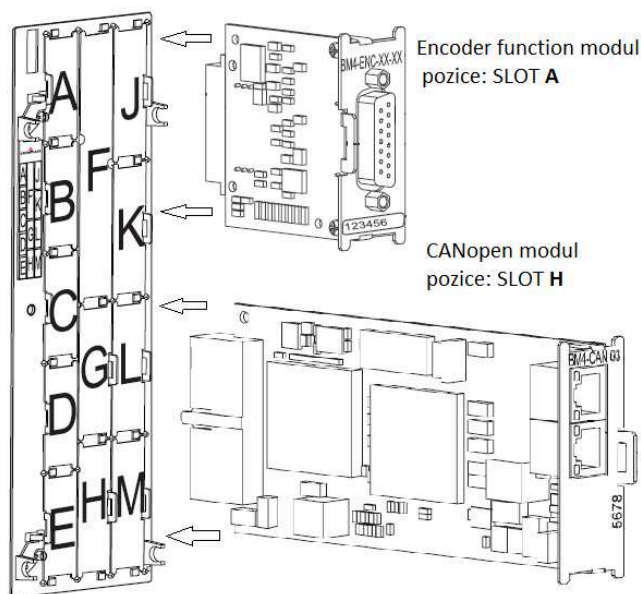
Obr. 14: Blokové schéma měniče b maXX 4400

Tabulka 4: Elektrické parametry měniče b maXX 4400

b maXX 4423-ST0-01200-03		
jmenovitý příkon	4,8	kVA
jmenovitý proud	12,4	A
činitel harmonického zkreslení vstupního proudu	109	%
Max. vstupní proud	23,2	A
jmenovité napětí meziobvodu	540	V
kapacita meziobvodu	470	uF
doba vybíjení meziobvodu	340	s
Výstupní napětí	3 x 0 .. 370	V
výstupní frekvence	0 .. 450	Hz
výstupní jmenovitý proud - 4 kHz	max. 11,0	A
výstupní jmenovitý proud - 8 kHz	max. 8,0	A
výstupní špičkový proud - 4 kHz	max. 22,0	A
výstupní špičkový proud - 8 kHz	max. 17,6	A
max. doba trvání špičkového proudu	60	s
výstupní svorky stejnosměrného meziobvodu	max. 5	kW
přípustný proud chopper rezistoru	max. 13	A
velikost extérního chopper rezistoru	≥ 60	Ω
spouštěcí napětí chopper rezistoru	780	V
špičkový výkon chopper rezistoru	10	kW
přípustný stálý výkon chopper rezistoru	5	kW
ztrátový výkon na hlavním napájecím napětí	150	W
ztrátový výkon na řídicím napětí	max. 63	W
Proud řízení brzdy	max. 0,5	A

2.3.1 Příprava měniče před uvedením do provozu

Měníče b maXX 4400 mají k dispozici několik volných slotů, které si uživatel může osadit dle svého uvážení různými moduly, buď pro komunikaci nebo moduly vybavenými analogovými nebo digitálními vstupy/výstupy. K dispozici jsou moduly AI/AO, DI/DO, ENC a CANopen. Montáž těchto modulů je velice jednoduchá a je naznačena na obr. 15.



Obr. 15: Montáž modulů do čelního panelu měniče

Aktivace řídicí části měničů

Pro aktivaci řídicí části měniče, je zapotřebí přivést DC napětí na konektory: X100 pin 1: +24 VDC, pin 6: -24 VDC. Ve slotu **F** na konektor X3 pin 3: -24 VDC a na piny 4 a 5: +24 VDC. Viz také příloha č. 3. Na vstupní svorkovnici, kde se nacházejí svorky 1U1, 1V1, 1W1, PE, 1C1, 1D1, Ba+ a Ba-, je na svorky 1U1, 1V1 a 1W1 přivedeno trojfázové napájení ze sítě.

Postup aktivace měničů

Při aktivaci měničů musí být dodržen následující postup. V prvním kroku je aktivována napěťová větev 24 VDC a čeká se 10 sekund na bootování řídicí části měničů, poté se připojí hlavní napájecí napětí. Při vypínání měničů se větev s 24 VDC odpojuje jako poslední.

2.3.2 Komunikace měniče s okolním prostředím

Pohony od společnosti Baumüller jsou především používány jako pohony NC obráběcích strojů v průmyslu. Existuje několik možností, jak lze nastavovat parametry měniče a ovládat pohon. Mohou být použity následující komunikační sběrnice a rozhraní:

- sériové rozhraní RS-232
- CANopen
- OPC
- PROFIBUS
- SERCOS

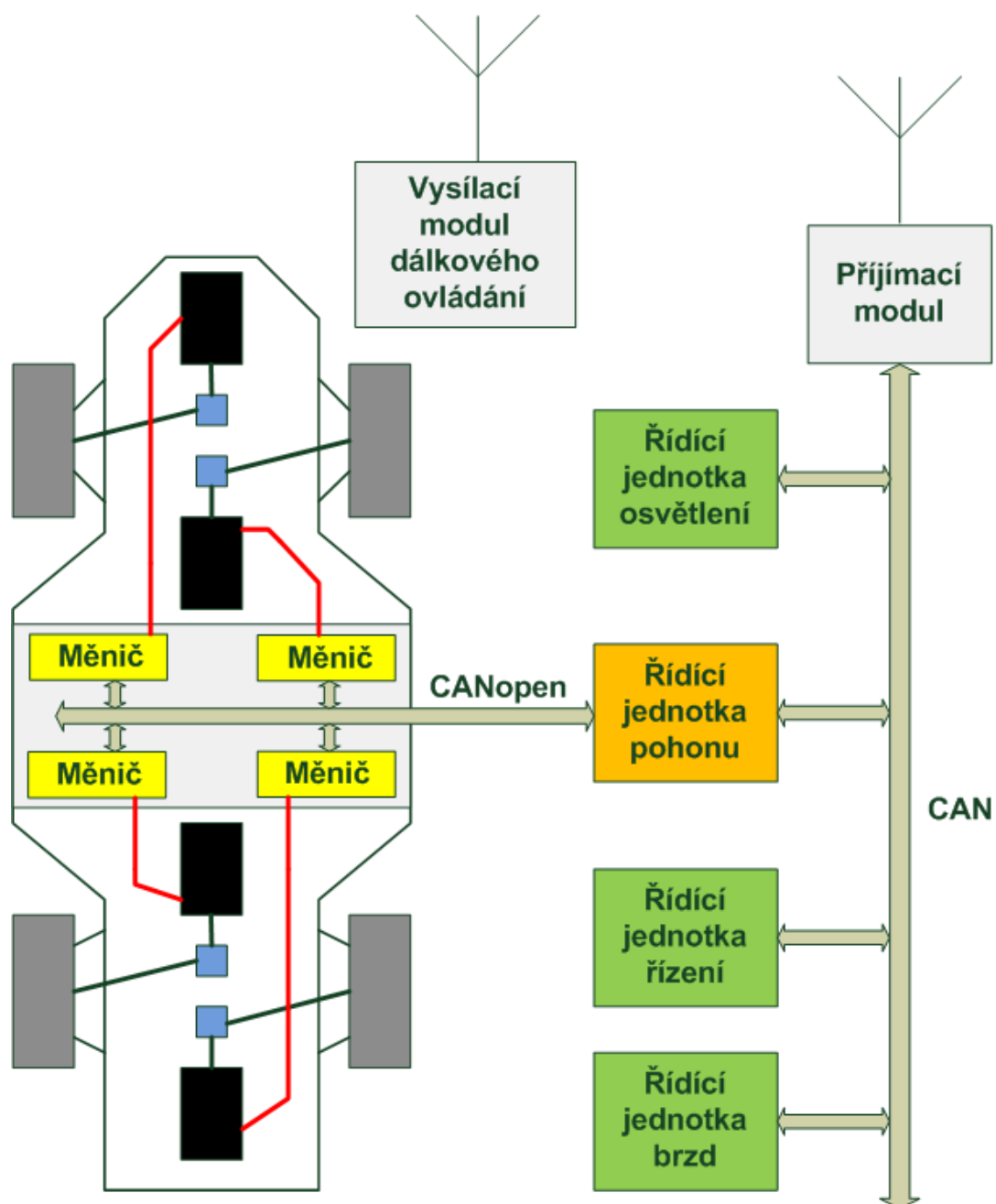
V aplikaci pohonu vozidla „Democar“ lze využít komunikační rozhraní CANopen. U pohonů Baumüller vychází ze standardu CAN 2.0A, který má 11-bitový identifikátor. Řídící jednotka bude vybavena dvěma kanály CAN.

Využití komunikačního rozhraní pohonu vozidla „Democar“

RS-232 – Sériová linka je především využívána k diagnostice pohonu, k nahrávání konfigurací do EEPROM paměti měniče a pro nastavení parametrů při testování. Komunikace pomocí RS-232 není vhodná pro využití dálkového ovládání vozidla.

CANopen – Sběrnice je schopná komunikovat rychlostí až 1 Mb/s a využívá se pro editaci zvolených parametrů pomocí řídicí jednotky pohonu ovládané z dálkového ovladače. Pro otestování komunikace po CANopen je využíván převodník USB2CAN.

Uspořádání komunikační struktury je uvedeno na obr. 16. Celá komunikační síť vozidla „Democar“ je tvořena CAN sběrnici propojující řídicí jednotky jednotlivých systémů a CANopen sběrnicí, která je určena pouze pro komunikaci řídicí jednotky pohonu s měniči.



Obr. 16: Blokové schéma sběrnice sítě vozidla „DEMOCAR“

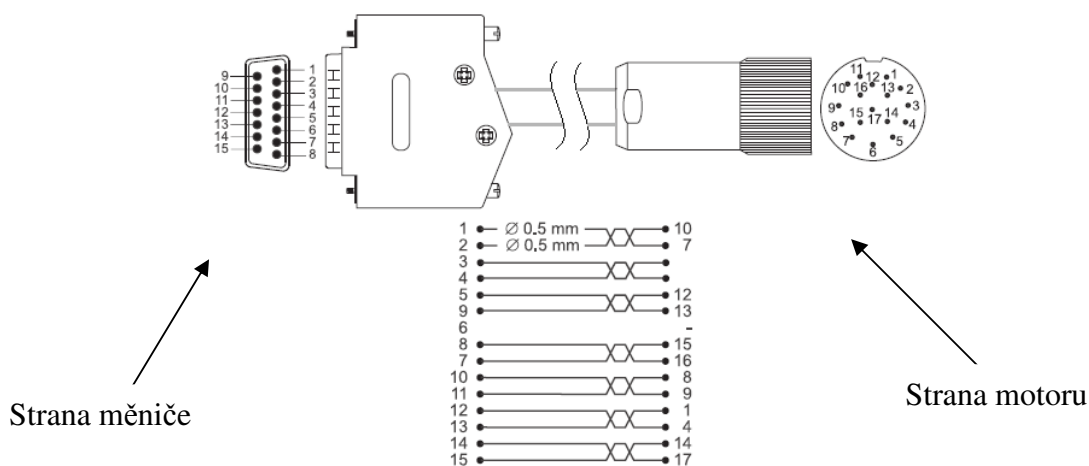
[10], [12]

3. Pohonná jednotka v režimu individuálního pohonu jednoho kola

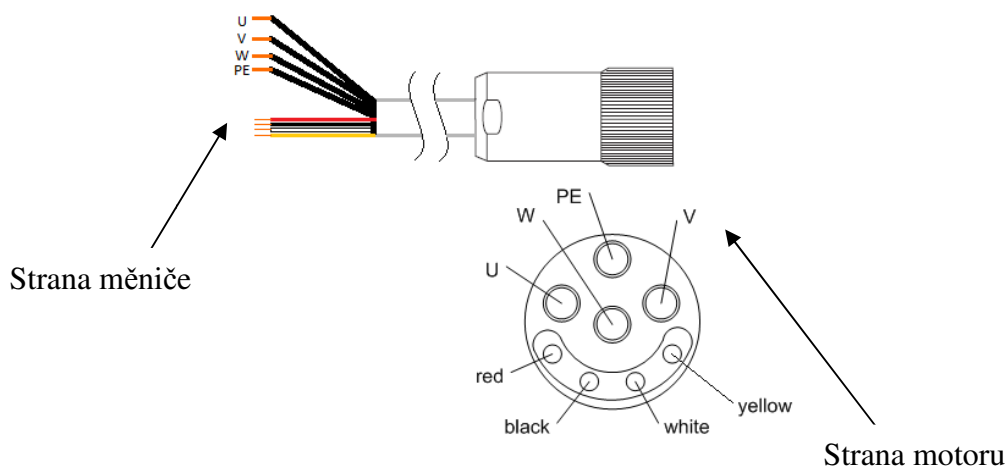
Pro zajištění bezpečného průběhu testování je pohonná jednotka uchycena k ocelovému rámu. Pro test individuálního pohonu kola jsou použity dva motory, jejichž spojení hřídelí je provedeno pomocí spojky. Během testování je pozorováno chování pohonu v jeho různých pracovních režimech. Zejména je potřeba ověřit možnost generátorického režimu pro dobíjení akumulátorů.

3.1 Připojení motoru k měniči

Motor se k měniči připojuje pomocí dvou více žilových kabelů. První kabel je silový pro připojení fází U, V, W a zemního vodiče PE a se čtyřmi signálovými vodiči viz obr. 18. Druhý kabel je připojen k modulu enkodéru motoru viz obr. 17.



Obr. 17: Propojovací kabel enkodéru a měniče



Obr. 18: Silový kabel propojující měnič a motor

3.2 Nastavení pohonu s programem ProDrive

Připojení PC pomocí prostředí ProDrive k měniči

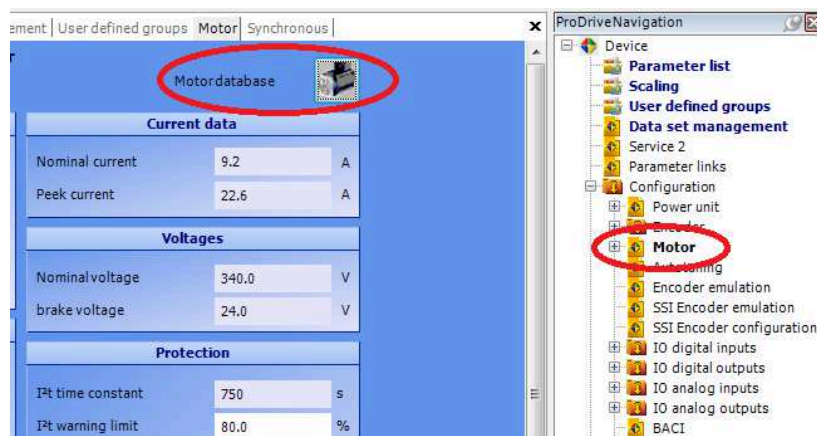
PC, na kterém je nainstalován řídicí software ProDrive je propojen s měničem pomocí sériové linky RS-232. Po zapnutí PC je spuštěno prostředí ProDrive. Zapne se měnič a chvíli se vyčká na jeho aktivaci. V okně ProDrive se v levém sloupci zvolí možnost **Select Device**. Další okno se nastaví dle obr. 19. a potvrdí se tlačítkem OK. Zároveň s potvrzením se vytvoří i nově založený projekt.



Obr. 19: Nastavení komunikace mezi PC a měničem

Výběr a nastavení motoru:

Po založení projektu se v levém dolním rohu stiskne tlačítko **Connect**, aby se propojilo PC s měničem. Dále se ve stromové struktuře navigačního okna vyhledá položka **Device** → **Configuration** → **Motor**. Uprostřed okna se vybere možnost **Motor database** a zvolí se motor DSC100-S64U, jak je uvedeno na obr. 20.



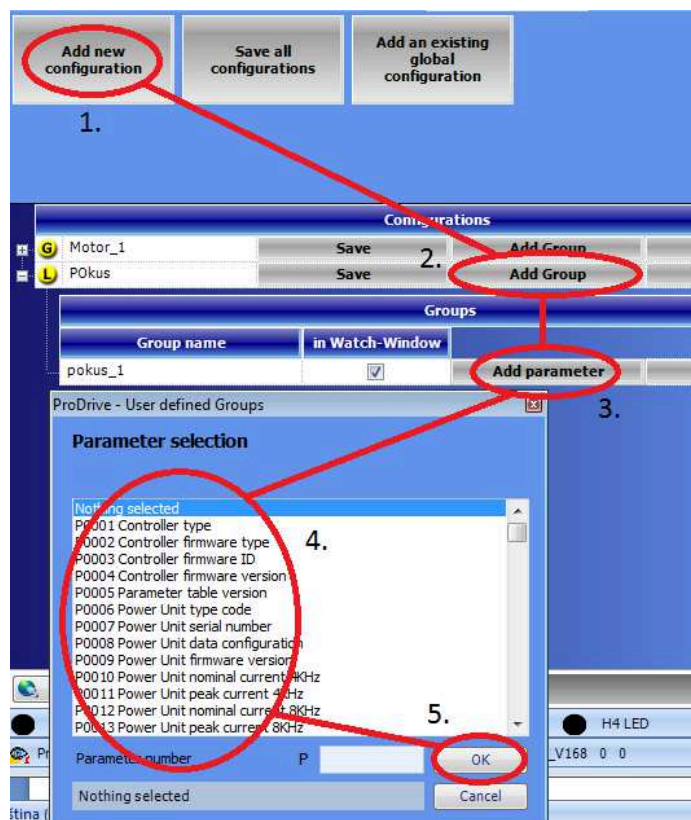
Obr. 20: Nastavení typu motoru

Po vybrání motoru si měnič načte jeho základní údaje a předvolené parametry. Poté lze tyto parametry měnit v záložce **Parameter list**, kde jsou uvedeny všechny možné nastavitelné parametry pohonu. Daleko lepší volbou je vytvoření vlastní skupiny parametrů v záložce **User defined group**.

Vytvořená skupina parametrů se zobrazí i ve zmiňované záložce **Parameter list** a zjednoduší se tak přístup k požadovaným parametrům.

Příklad:

Zvolí se záložka **User defined group** a klikne se na možnost **Add new configuration**. Nová konfigurace se pojmenuje např. Motor_1, zvolí se možnost **Add group** a pojmenuje se nová skupina parametrů. Nyní se stiskne tlačítko **Add parameter**. Vyskočí okno se seznamem všech parametrů. Nyní stačí najít hledané parametry a vložit je do uživatelské skupiny. Postup je znázorněn na obr. 21. K otestování pohonu je zapotřebí postupně vyhledat ostatní parametry, které nastavují rozjezd, zastavení a požadované otáčky motoru.



Obr. 21: Vytvoření skupiny parametrů

Zkouška funkce motoru

Záložka **Set value generators** se otevře pomocí znaku „+“ na jejím okraji. Následně se vybere možnost **Ramp function generator**. Na této kartě je obrázek lichoběžníku znázorňujícího průběh rozjezdu a dojezdu pohonu. Kolem obrázku jsou rozmístěny buňky, jejichž obsah lze editovat.

- 1) Input (P1171)
- 2) Set value zone (P1178)
- 3) Ramp-up time – délka trvání náběžné hrany [s] (P1172)
- 4) Ramp-down time – délka trvání sestupné hrany [s] (P1173)
- 5) Smoothing – vyhlazování (P1175)
- 6) Speed set value – nastavení hodnoty rychlosti (P0351)
- 7) Output – informace o dosažené hodnotě otáček na výstupu (P0431)

Obsah těchto buněk se vyplní dle tabulky 5.

Tabulka 5: Nastavení parametrů rampy pro otestování pohonu

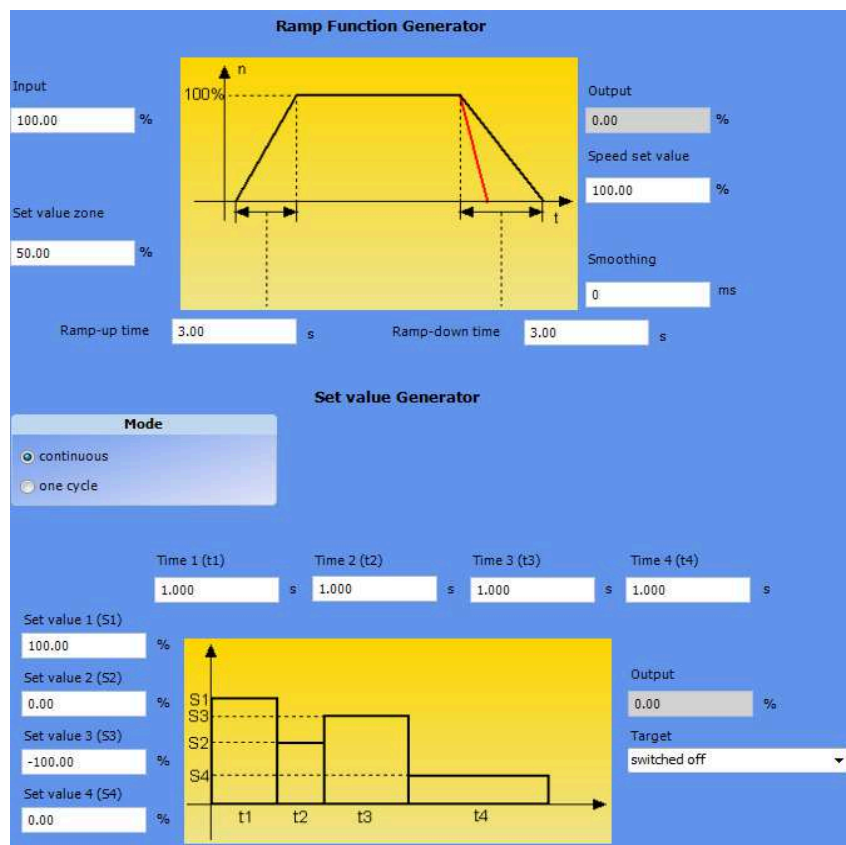
input	100	%	P1171
Set value zone	50	%	P1178
Ramp-up time	3	s	P1172
Ramp-down time	3	s	P1173
Smoothing	0	ms	P1175
Speed set value	100	%	P0351

Přejde se na záložku **Set value generator**, kde se uprostřed stránky nachází graf obdélníkových průběhů a několik kolonek, které musí být nastaveny dle tab. 6. Kolonku **MODE** se ponechá v poloze „continuous“.

Tabulka 6: Nastavení pracovních režimů pohonu s čísly parametrů

Set value 1	100	%	P0442
Set value 2	0	%	P0444
Set value 3	-100	%	P0446
Set value 4	0	%	P0448
Time 1	10	s	P0441
Time 2	5	s	P0443
Time 3	10	s	P0445
Time 4	5	s	P0447
Target	Ramp function generator input		P0440

Tato možnost testování pohonu se vybírá v případě, když je pohon buď vymontován z vozidla nebo je vozidlo „Democar“ zvednuté na zvedáku a kola se neopírají o pevnou podložku. Jedná se pouze o otestování správného zapojení motorů a zda-li se opravdu jejich hřídele otáčejí směrem předdefinovaným dle pracovního diagramu.



Obr. 22: Ukázky nastavení parametrů pohonu

Parametry uvedené na kartách **Ramp function generator** a **Set value generator** se nemusí měnit přímo na těchto kartách. Pokud jsou tyto parametry vloženy do skupiny definovaných parametrů, jak bylo popsáno dříve, lze je měnit dynamicky i za běhu motorů a všechny parametry budou uspořádány v přehledné tabulce.

Configurations							
 Motor_1	Save	Add Group	Delete				
Groups							
Group name	in Watch-Window						
Drive_param	<input checked="" type="checkbox"/>	Add parameter	Delete				
Name	Value	Unit	Min.	Max.	Number	Descript	
BM_w_...	0x0000		0x0000	0xFFFF	P0300	Control...	Delete
BM_w_...	0x0000		0x0000	0xFFFF	P0301	Statusw...	Delete
BM_u_...	1.000	s	0.001	65.535	P0441	SVG tim...	Delete
BM_i_S...	100.00	%	-100.00	100.00	P0442	SVG set...	Delete
BM_u_...	1.000	s	0.001	65.535	P0443	SVG tim...	Delete
BM_i_S...	0.00	%	-100.00	100.00	P0444	SVG set...	Delete
BM_u_...	1.000	s	0.001	65.535	P0445	SVG tim...	Delete
BM_i_S...	-100.00	%	-100.00	100.00	P0446	SVG set...	Delete
BM_u_...	1.000	s	0.001	65.535	P0447	SVG tim...	Delete
BM_i_S...	0.00	%	-100.00	100.00	P0448	SVG set...	Delete
BM_u_...	3.00	s	0.00	650.00	P1172	Ramp F...	Delete
BM_u_...	3.00	s	0.00	650.00	P1173	Ramp F...	Delete

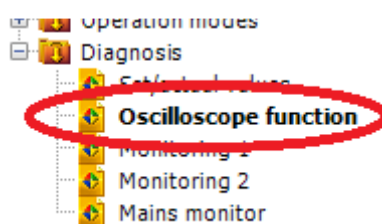
Obr. 23: Tabulka vybraných parametrů

Pokud byly parametry nastaveny dle již uvedeného postupu, lze přejít ke spuštění motoru. Toto spuštění je provedeno na kartě **Management**→**Drive management**. Kliknutím na tlačítko **START** se motor roztočí na požadovanou hodnotu otáček s nástupem dle rozběhové rampy. Délka doby odpojení pohonu je závislá na hodnotě doběhové rampy. Pokud je pohon nastaven úspěšně, proběhne test v pořádku.

Testování pohonu

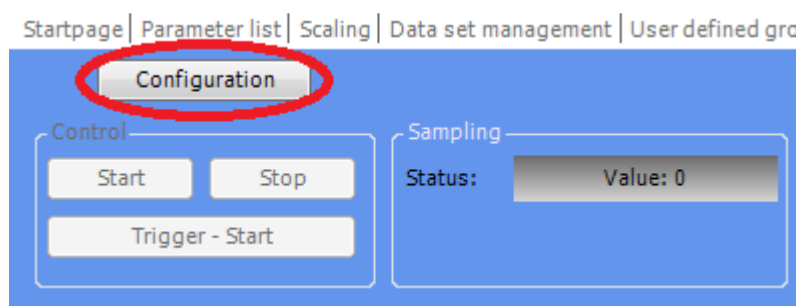
Software ProDrive umožňuje měřit většinu hledaných veličin od velikosti zátěžového momentu na hřídeli motoru až po měření teploty uvnitř měniče. Prostředí ProDrive také umožňuje převést výsledné charakteristiky do souboru csv, které tak mohou být přeneseny a upraveny např. v programu Excel.

Funkce **Osciloskop** se nachází ve stromovém adresáři pod záložkou **Diagnosis** → **Oscilloscope function**.



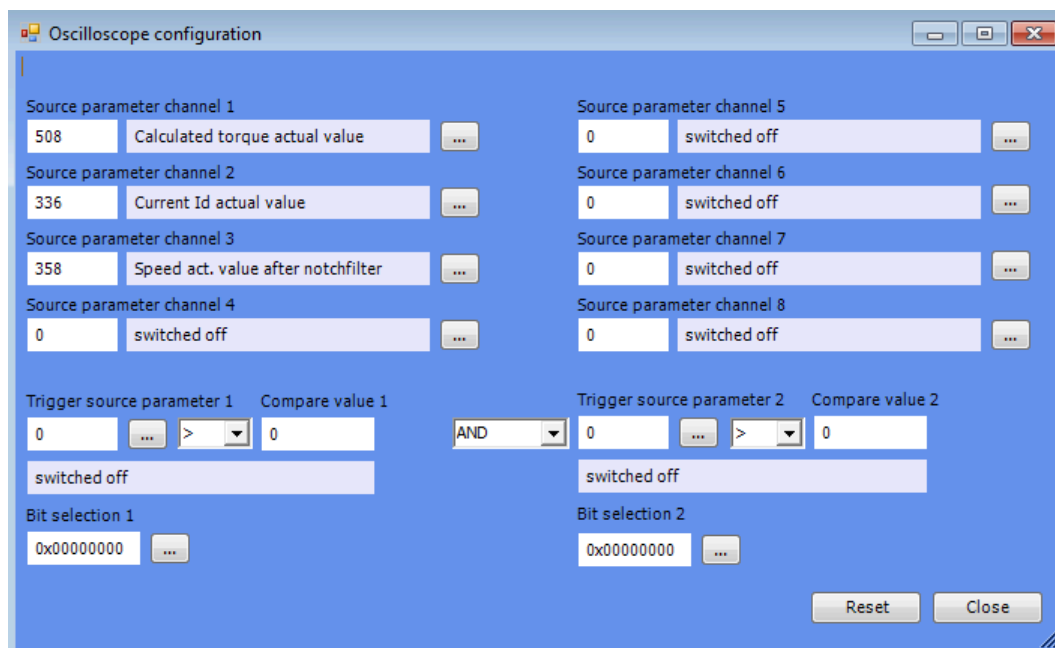
Obr. 24: Funkce osciloskop – navigace ve stromové struktuře

Volba měřených parametrů se nachází pod tlačítkem **Configuration** viz obr. 25. Zobrazí se nové okno a v něm je možné nastavit až 8 libovolných parametrů, jejichž průběh má být zaznamenán.



Obr. 25: Tlačítko pro výběr měřených parametrů

Pro ukázkou byly zvoleny parametry P0336 (aktuální hodnota proudu), P0358 (aktuální hodnota otáček) a P0508 (aktuální vypočtená hodnota točivého momentu).



Obr. 26: Volba měřeným parametrů

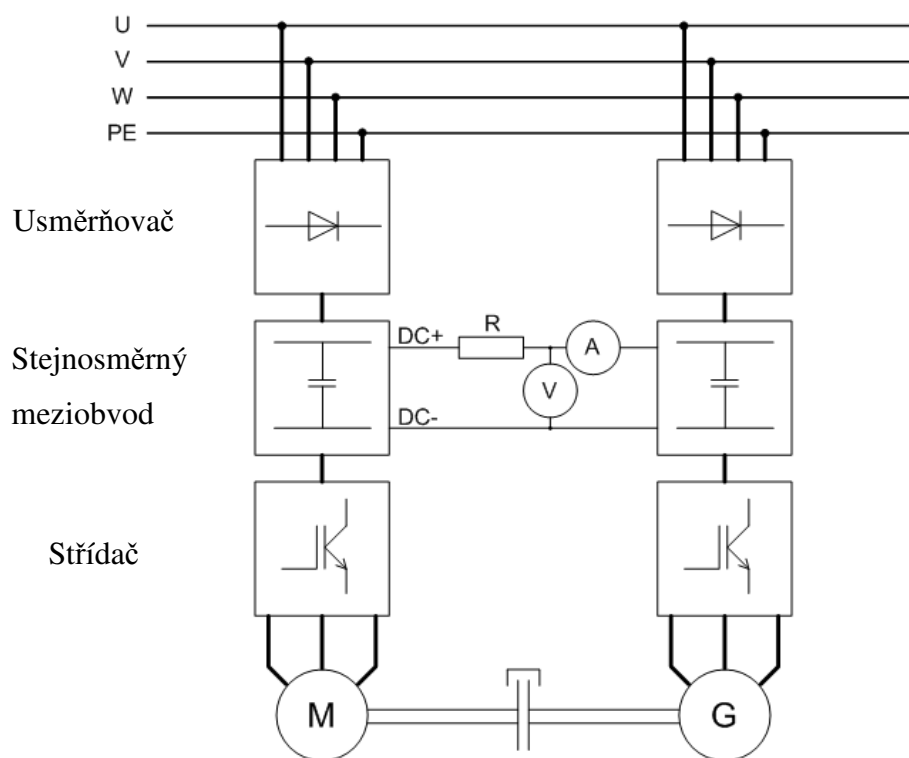
Délku zaznamenávaných dat je možné nastavovat na kartě **Oscilloscope function** v kolonkách **Oscilloscope memory** a **Sample rate**.

3.3 Ověření parametrů pohonu

Na obr. 27 je uvedeno blokové schéma zapojení testovacího obvodu pohonu, kde jeden motor pracuje jako pohon a druhý motor zastává funkci brzdy. Po roztočení prvního motoru se druhý motor dostane do proudového omezení a začne generovat napětí, které se vrací skrze zpětné diody střídače do meziobvodu měniče. V důsledku propojení meziobvodů obou měničů se jejich napětí vyrovnávají.

Do kladné větve je zařazen odpor s nízkou ohmickou hodnotou a klešťový ampérmetr sleduje procházející proud. Hodnota napětí meziobvodu se zobrazí v parametru P0484.

Pro získání charakteristik zatěžovacího momentu, odebíraného proudu, atp. jsou použita měření na osciloskopu, které jsou součástí softwaru ProDrive.



Obr. 27: Schéma pro měření charakteristik pohonu

Generátorický režim

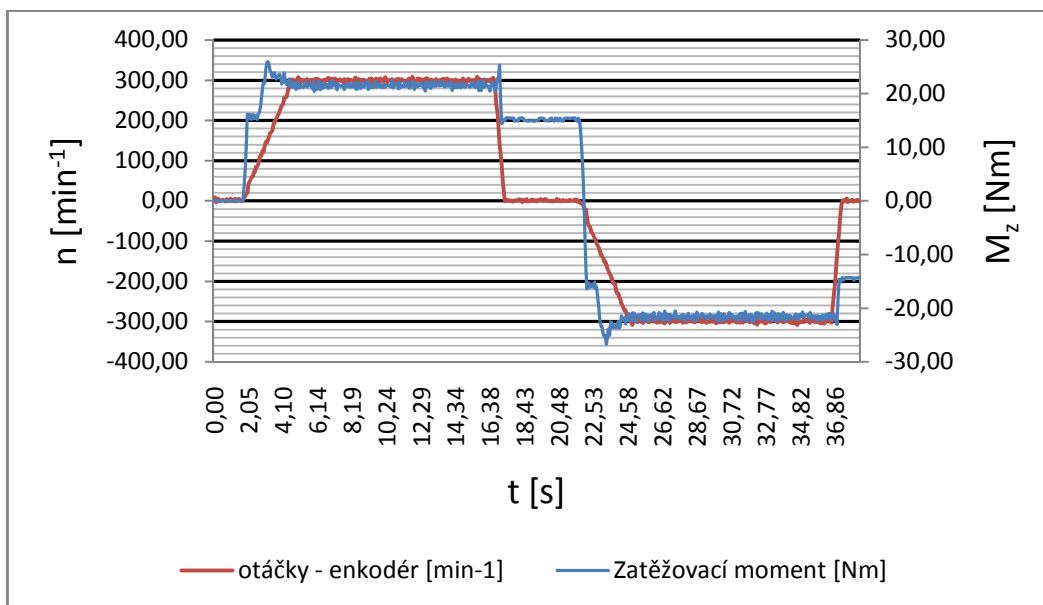
Nastavení pohonné jednotky do brzdného režimu:

Je potřeba vyhledat parametr maximální hodnoty momentu motoru: P0357 **Torque limiter bipolar**. Aktuální hodnota pole ve sloupci **Value** je nastavena na hodnotu 43,2 Nm. Tuto hodnotu je možné libovolně přepisovat v rozsahu 0 až 43,2 Nm. Pro test se nastaví hodnota 15 Nm. Nastavení hodnoty otáček $n = 0 \text{ min}^{-1}$ se provede v parametru P1171 **Ramp function gen. Input**. Poté lze spustit motor pomocí tlačítka **Opens drive manager** na horní liště.

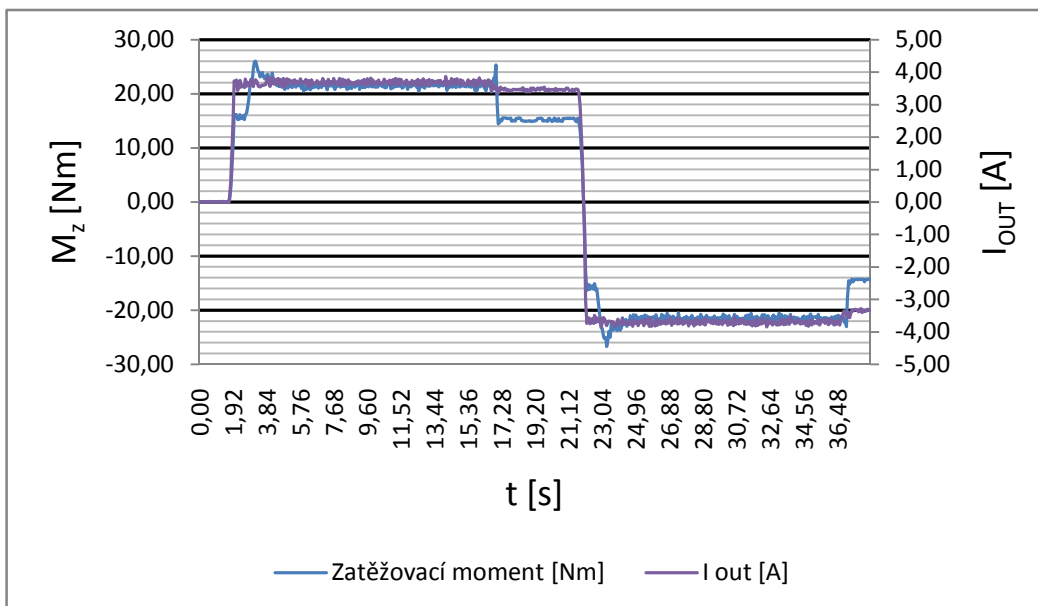
Druhému motoru se nastaví otáčky na hodnotu 300 min^{-1} a jeho momentové omezení (P0357) se ponechá na hodnotě 43,2 Nm. Do rozběhové rampy (P1172) se zadá hodnota 10 s.

Po spuštění motoru působí jeho krouticí moment na hřídel druhého motoru, který je nastaven do proudového omezení a vytváří tak brzdný moment. Otáčením jeho rotoru, se na statoru indukuje napětí, v jehož důsledku protéká proud zpětnými diodami střídače do meziobvodu. To má za následek narůstání hodnoty DC napětí na meziobvodu.

Na obr. 28 a 29 jsou uvedeny průběhy z testování pohonu na jednom kole. Test je proveden pro $n = \pm 300 \text{ min}^{-1}$ se zatěžovacím momentem $M_Z = \pm 15 \text{ Nm}$. Graf otáček a momentu na obr. 28 znázorňuje rozjezd pohonu dle rozběhové rampy na hodnotu požadovaných otáček. I když otáčky stoupají plynule dle nastavené rampy, hodnota zatěžovacího krouticího momentu je skoková. Z nastavených 15 Nm na brzdu, musí motor vyvinout vyšší krouticí moment asi o 7 Nm , aby udržel nastavené požadované otáčky.



Obr. 28: Průběh zatěžovacího momentu a otáček na hřídeli zatíženého motoru



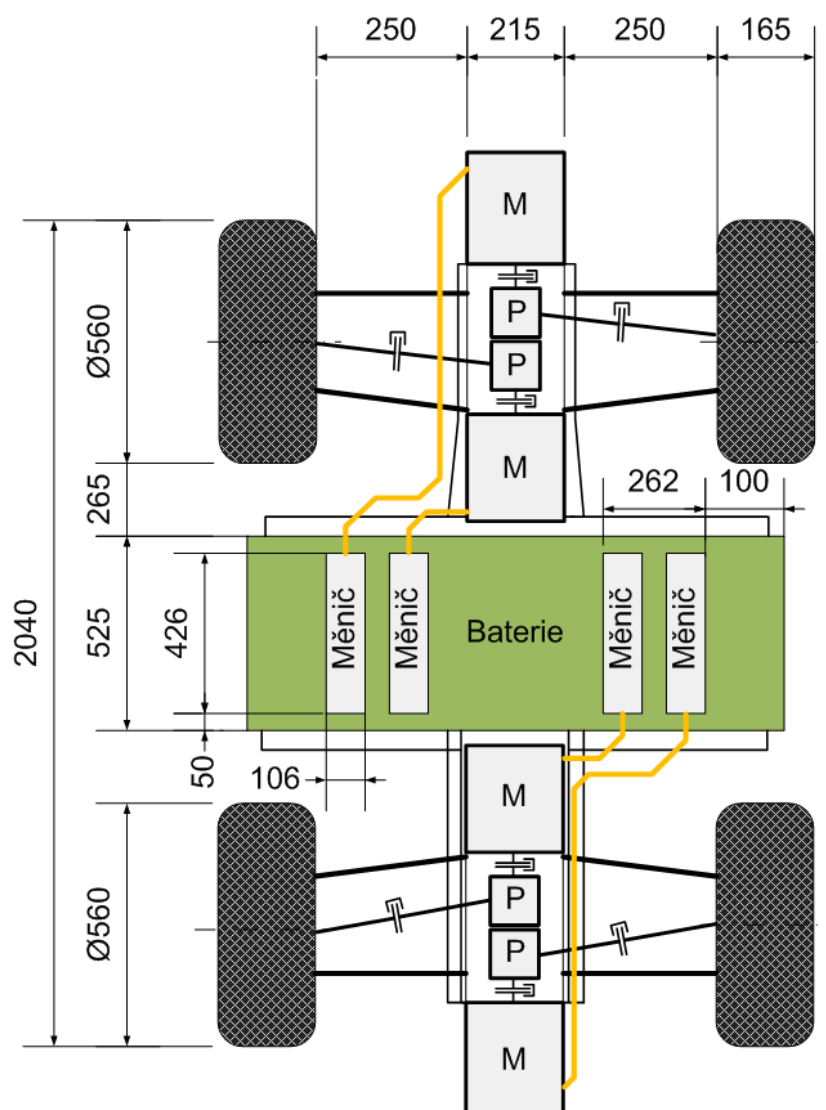
Obr. 29: Průběh zatěžovacího momentu a výstupního proudu měniče

[12], [13]

4. Zástavba motorů do demonstračního vozidla „DEMOCAR“

Šasi demonstračního vozidla tvoří podvozek čtyřkolky GOES 625. Jedná se o pracovní čtyřkolku s pohonem 4x4. Před montáží elektrického pohonu IWD do tohoto šasi je nutné provést úpravy a přizpůsobení rámu čtyřkolky. Především se jedná o přivaření nosných konstrukcí, ke kterým budou uchyceny motory s převodovkami. Měníče budou umístěny nad bateriovým boxem na izolovaných podložkách. Viz obr. 30

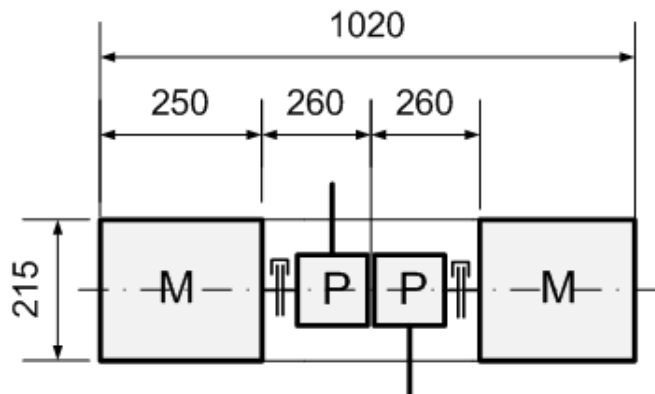
Koncepce montáže:



Obr. 30: Schéma montáže pohonu do podvozku vozidla

Na obr. 30 je uveden návrh přibližného rozmístění 4 motorů [M] na nápravách a jsou zde uvedeny základní rozměry. Sestava pohonu je uložena v podélné ose vozidla. Hřídele motorů jsou spojeny se vstupními hřídelemi převodovek [P] pomocí spojek.

Další spojky spojují výstupní hřídele převodovek a hřídele poloos kol. Převodovky mají převodový poměr 1:1 a každá z náprav je vybavena dvojicí sestav motor + spojka + převodovka. Přibližné rozměry kompletního pohonu pro jednu nápravu jsou uvedeny na obr. 31. V přílohách č. 7, 8, 9 a 10 jsou uvedeny fotografie sestavy pohonu.



Obr. 31: Rozměry sestavy pohonu pro jednu nápravu

Převodovky jsou vybrány na základě velikosti maximálního krouticího momentu motoru. Označení UNIMEC RS-86-S3: jedná se o velikost 86 a uspořádání vstupní a výstupní hřídele je v provedení S3 – do pravého úhlu. Viz příloha č. 6. Použité spojky jsou typu GIFLEX, jejich katalogový list je uveden v příloze č. 5.

Rozměry použitých spojek:

Na straně motoru má spojka otvor o průměru 38 mm a na výstupní straně spojky má otvor průměr 16 mm, do kterého se nasune vstupní hřídel převodovky. Za převodovkou je spojka s otvory se stejným průměrem 24 mm, která spojuje její výstupní hřídel s poloosou kola.

4.1 Nastavení měničů pro aplikaci ve vozidle „Democar“

Pro použití měničů na vozidle „Democar“ a připojení napájení z DC zdroje je potřeba změnit nastavení měniče pomocí programu ProDrive. V pravém navigačním sloupci se vybere karta **Configuration** → **Power unit**. Uprostřed okna se nachází kolonka **DC link supply**. V této kolonce je nutné přepnout volbu **from mains** na možnost **external** viz *obr. 31*. Po tomto úkonu je nutné nahrát novou konfiguraci do EEPROM paměti měniče. Na kartě **Data Set Management** se spouští upload nastavení tlačítkem **Save all**. Nahrání nové konfigurace trvá přibližně 45 sekund.



Obr. 32: Nastavení napájení měniče z DC zdroje

Dále se postupuje podle návodu, pro zapojení jednotlivých konektorů měniče, uvedeného v bodě 2.3.1. Měnič hlídá fázová napětí na vstupních svorkách. V případě, že je použitý externí zdroj stejnosměrného napájení je nutné přivést napájecí napětí na svorky 1C1 pro U_{Bat+} (DC+) a 1D1 U_{Bat-} (DC-). Do pinu 3 na konektoru X100 se přivede napětí +24 VDC, aby byl eliminován chybový stav měniče **Error 64 „mains missing“**.

Ověření parametrů pohonu na vozidle:

Než se začne vozidlo „Democar“ testovat na silnici, je zapotřebí provést otestování a odladění systému na válcové stoličce v laboratoři. Mezi hlavní testované funkce patří aktivace pohonu vozidla, rozjezd vozidla a jeho brzdění a bezpečné zastavení vozu v případě ztráty signálu z dálkového ovládání.

Je také nutné ověřit vzájemnou komunikaci všech řídicích jednotek připojených do sběrnice CAN.

[10], [12],[13]

5. Závěr

Tato diplomová práce si kladla za cíl analyzovat hlavní požadavky na novou možnost pohonu kol IWD a navrhnout vhodné řešení pro realizaci pohonu vozidla s tímto systémem.

Z různých typů elektromotorů byl zvolen pro pohon trojfázový synchronní motor s permanentními magnety řízený trojfázovým střídačem.

Na základě dimenzování byly stanoveny parametry konkrétního typu elektromotoru, který s dostatečnou rezervou umožňuje pohon našeho, přibližně 500 kg těžkého, demonstračního vozidla „Democar“. Pro realizaci byl vybrán pohon od společnosti Baumüller. Za podpory uživatelských manuálů bylo provedeno oživení a nastavení pohonu s ověřením jeho vlastností na laboratorním stanovišti.

Práce se dále zaměřovaly na ověření parametrů vybraného pohonu na sestavě s jedním kolem, kdy jízdní odpory byly simulovány brzdovým režimem druhého motoru. Byly rovněž ověřeny možnosti komunikace měniče s nadřazeným řídicím systémem, což je u pohonu s IWD nezbytnou součástí algoritmů pro vyhodnocování aktuálních stavů chování vozidla při jízdě.

Práce rovněž velice zjednodušeně dokumentuje zástavbu celého pohonu do vozidla „Democar“.

Seznam literatury

- [1] ŠVESTKA, David. Trakční motory. Atlas lokomotiv [online]. 2004-2014 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/page-tm.html>
- [2] KOPECKÝ, Ing. Ladislav. Reluktanční motor a elektromobil. In: KOPECKÝ, Ing. Ladislav. Reluktanční motor a elektromobil [online]. 2008 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: http://www.elektromobily.org/w/images/a/ad/Reluktancni_motor_Kopecky.pdf
- [3] SLÁDEČEK, PH.D., Ing. Václav. VŠB-TU OSTRAVA. Elektrické pohony. Ostrava, -. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~sla10/Elpo/Elpohony.pdf>
- [4] . LMS Software. . Sériový stejnosměrný motor [online]. [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.mylms.cz/text-24-seriovy-stejnosmerny-motor/>
- [5] KADANÍK, Petr. Řízení asynchronního motoru bez použití snímače rychlosti. Praha, 2004. Disertační práce. FEL ČVUT PRAHA.
- [6] STOLÁŘÍK, CSC., Ing. Milan a Doc. Ing. František VESELKA, CSC. Přehledová studie reluktančních motorů. Přehledová studie reluktančních motorů [online]. 2006, roč. 2006, č. 3, 1-6 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/el030604.pdf>
- [7] WELANDER, Peter. Střídavé motory s permanentními magnety. WELANDER, Peter. Control Engineering Česko [online]. 2010 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.controlengcesko.com/hlavni-menu/artikuly/artikul/article/stridave-motory-s-permanentnimi-magnety/>
- [8] Synchronní motor: Princip synchronního motoru. Pohonnatechnika.cz [online]. 2007-2014 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/synchronni-motor>
- [9] Protean Electric 2014: nové elektromotory pro náboje kol dávají problémy neřeší. Autoforum.cz [online]. 2013, roč. 2013 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/technika/protean-electric-2014-nove-elektromotory-pro-naboje-kol-davne-problemy-neresi/>
- [10] BAUMÜLLER NÜRNBERG GMBH. Three-phase synchronous motors: DSC 45-100 .. 540V. Německo, 2008.

- [11] BAUMÜLLER NÜRNBERG GMBH. BM4-O-CAN-03: CANopen-Slave for b maxx Application manual. Německo, 2005.
- [12] BAUMÜLLER NÜRNBERG GMBH. B MAXX BM4400, BM4600, BM4700: Basic unit. Německo, 2011.
- [13] BAUMÜLLER NÜRNBERG GMBH. B maXX 4400 Basic Unit: Parameter manual. Německo, 2003.

Seznam příloh

Příloha č. 1 – Tabulka hodnot jízdních odporů pro úhly stoupání: 2° , 4° a 6°

Příloha č. 2 – Tabulka vypočtených hodnot součtových sil jízdních odporů a přepočtených krouticích momentů pro úhly stoupání: 2° , 4° a 6°

Příloha č. 3 – Rozmístění a popis konektorů měniče b maXX 4400

Příloha č. 4 – Výkresový list s rozměry motoru DSC100

Příloha č. 5 – Katalogový list spojek GIFLEX

Příloha č. 6 – Katalogový list použitých převodovek UNIMEC

Příloha č. 7 – Fotografie přípravy před montáží pohonu

Příloha č. 8 – Fotografie sestavy pohonu

Příloha č. 9 – Fotografie zabudovaného pohonu IWD – pohled zepředu

Příloha č. 10 - Fotografie zabudovaného pohonu IWD – boční pohled

Přílohy

Příloha č. 1

O_f - valivý odpor, $\alpha = 0^\circ$ [N]	O_f - valivý odpor, $\alpha = 2^\circ$ [N]	O_f - valivý odpor, $\alpha = 4^\circ$ [N]	O_f - valivý odpor, $\alpha = 6^\circ$ [N]	O_s - odpor stoupání, $\alpha = 0^\circ$ [N]	O_s - odpor stoupání, $\alpha = 2^\circ$ [N]	O_s - odpor stoupání, $\alpha = 4^\circ$ [N]	O_s - odpor stoupání, $\alpha = 6^\circ$ [N]	O_{vz} - vzdušný odpor [N]
56,51	56,47	56,37	56,20	0,00	164,33	328,47	492,20	0,00
56,51	56,47	56,37	56,20	0,00	164,33	328,47	492,20	0,92
56,51	56,47	56,37	56,20	0,00	164,33	328,47	492,20	3,69
56,51	56,47	56,37	56,20	0,00	164,33	328,47	492,20	8,30
56,51	56,47	56,37	56,20	0,00	164,33	328,47	492,20	14,75
56,51	56,47	56,37	56,20	0,00	164,33	328,47	492,20	23,05
56,51	56,47	56,37	56,20	0,00	164,33	328,47	492,20	33,19
56,51	56,47	56,37	56,20	0,00	164,33	328,47	492,20	45,17
56,51	56,47	56,37	56,20	0,00	164,33	328,47	492,20	59,00
56,51	56,47	56,37	56,20	0,00	164,33	328,47	492,20	74,67
57,46	57,42	57,32	57,14	0,00	164,33	328,47	492,20	92,19
59,39	59,35	59,24	59,06	0,00	164,33	328,47	492,20	111,55
61,32	61,28	61,17	60,98	0,00	164,33	328,47	492,20	132,76
63,25	63,21	63,10	62,91	0,00	164,33	328,47	492,20	155,80
65,18	65,14	65,02	64,83	0,00	164,33	328,47	492,20	180,69
67,11	67,07	66,95	66,75	0,00	164,33	328,47	492,20	207,43
69,05	69,00	68,88	68,67	0,00	164,33	328,47	492,20	236,01
70,98	70,93	70,81	70,59	0,00	164,33	328,47	492,20	266,43
72,91	72,87	72,73	72,51	0,00	164,33	328,47	492,20	298,70
74,84	74,80	74,66	74,43	0,00	164,33	328,47	492,20	332,81
76,77	76,73	76,59	76,35	0,00	164,33	328,47	492,20	368,76

Příloha č. 2

F_K - součtová síla jízdních odporů, $\alpha = 0^\circ$ [N]	F_K - součtová síla jízdních odporů, $\alpha = 2^\circ$ [N]	F_K - součtová síla jízdních odporů, $\alpha = 4^\circ$ [N]	F_K - součtová síla jízdních odporů, $\alpha = 6^\circ$ [N]	$M_K, \alpha =$ 0° [Nm]	$M_K, \alpha =$ 2° [Nm]	$M_K, \alpha =$ 4° [Nm]	$M_K, \alpha =$ 6° [Nm]
56,51	220,81	384,84	548,40	15,77	61,60	107,37	153,00
57,43	221,73	385,76	549,32	16,02	61,86	107,63	153,26
60,19	224,49	388,52	552,09	16,79	62,63	108,40	154,03
64,80	229,10	393,13	556,70	18,08	63,92	109,68	155,32
71,26	235,56	399,59	563,15	19,88	65,72	111,49	157,12
79,55	243,85	407,89	571,45	22,20	68,04	113,80	159,43
89,69	253,99	418,03	581,59	25,02	70,86	116,63	162,26
101,68	265,98	430,01	593,57	28,37	74,21	119,97	165,61
115,51	279,81	443,84	607,40	32,23	78,07	123,83	169,47
131,18	295,48	459,51	623,07	36,60	82,44	128,20	173,84
149,65	313,95	477,98	641,54	41,75	87,59	133,36	178,99
170,94	335,24	499,26	662,82	47,69	93,53	139,29	184,93
194,08	358,37	522,40	685,94	54,15	99,99	145,75	191,38
219,05	383,35	547,37	710,91	61,12	106,95	152,72	198,34
245,88	410,17	574,19	737,72	68,60	114,44	160,20	205,83
274,54	438,84	602,85	766,38	76,60	122,44	168,20	213,82
305,06	469,35	633,36	796,88	85,11	130,95	176,71	222,33
337,41	501,70	665,71	829,23	94,14	139,97	185,73	231,35
371,61	535,90	699,90	863,41	103,68	149,52	195,27	240,89
407,65	571,94	735,94	899,44	113,73	159,57	205,33	250,95
445,54	609,83	773,82	937,32	124,30	170,14	215,90	261,51

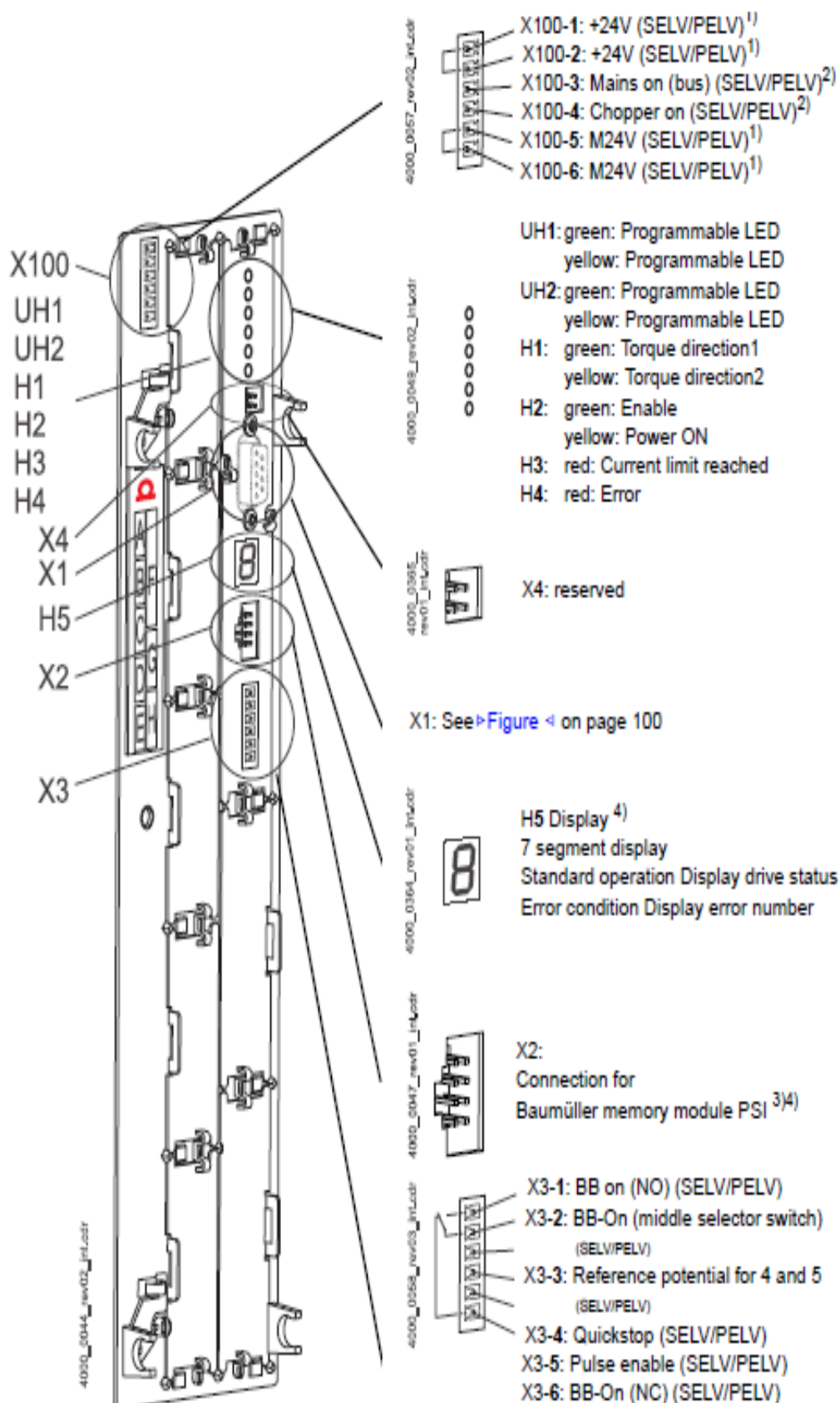
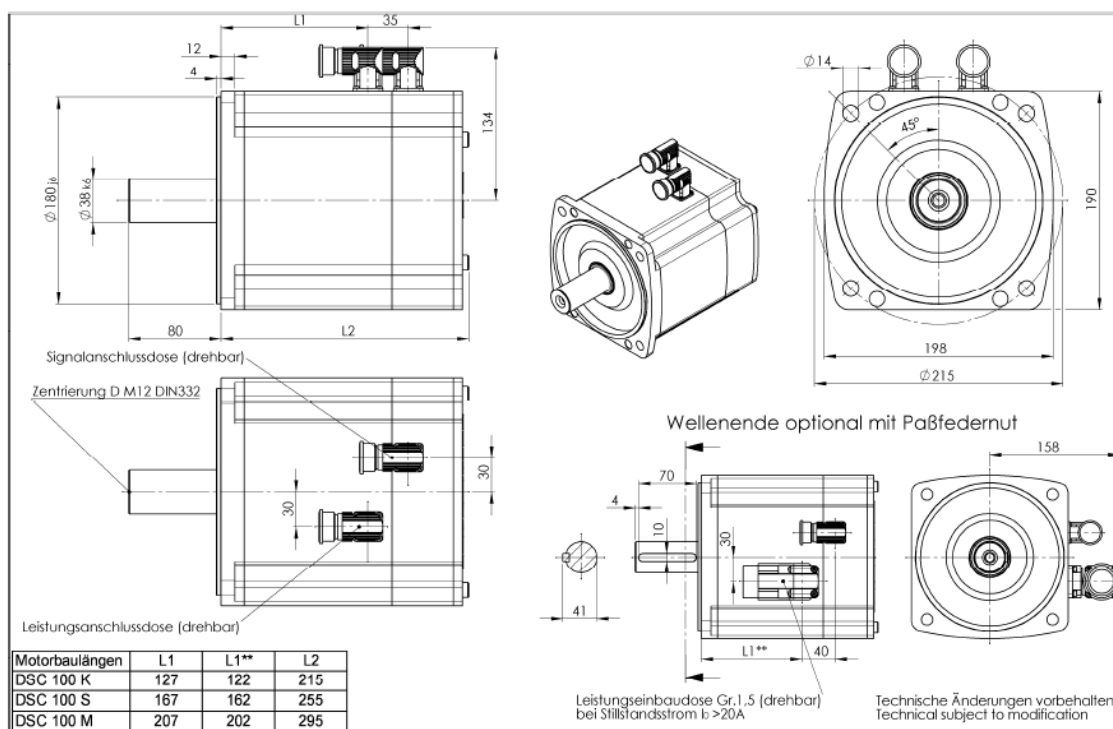
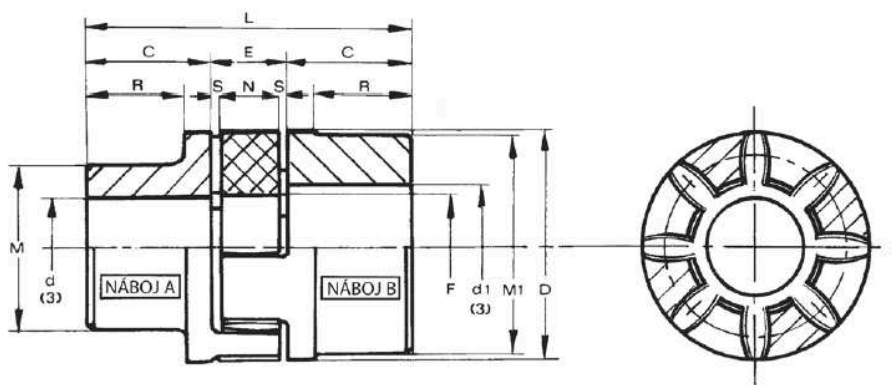


Figure 62: Connection X100 and connections of the controller unit

Příloha č. 4

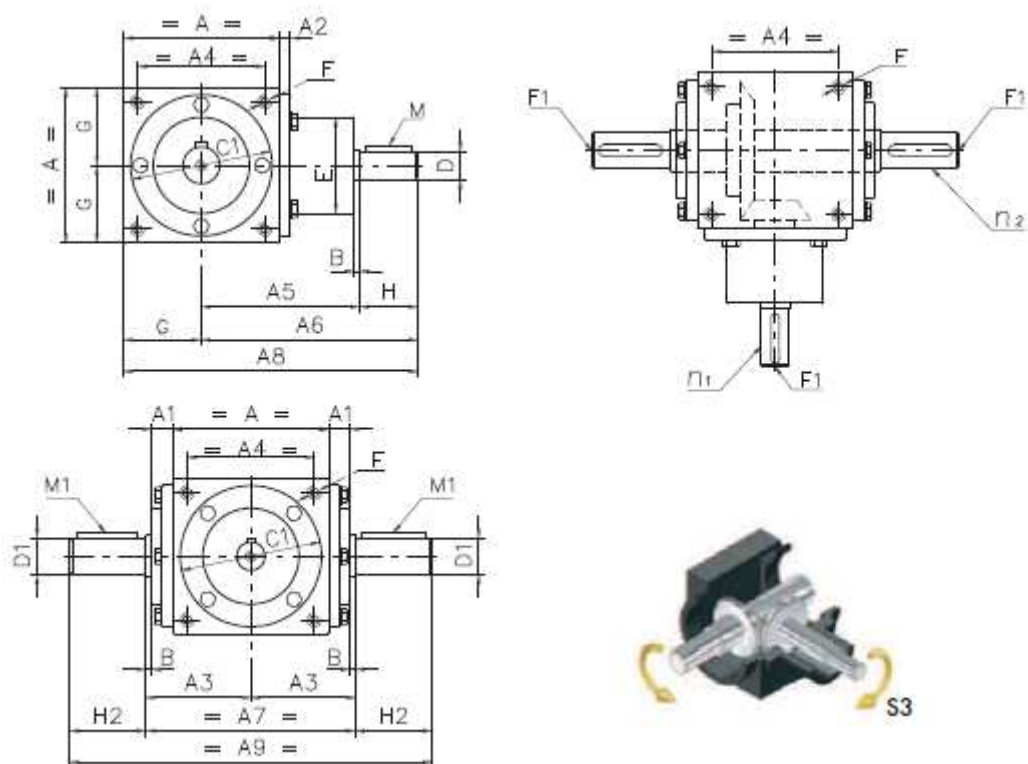


Příloha č. 5



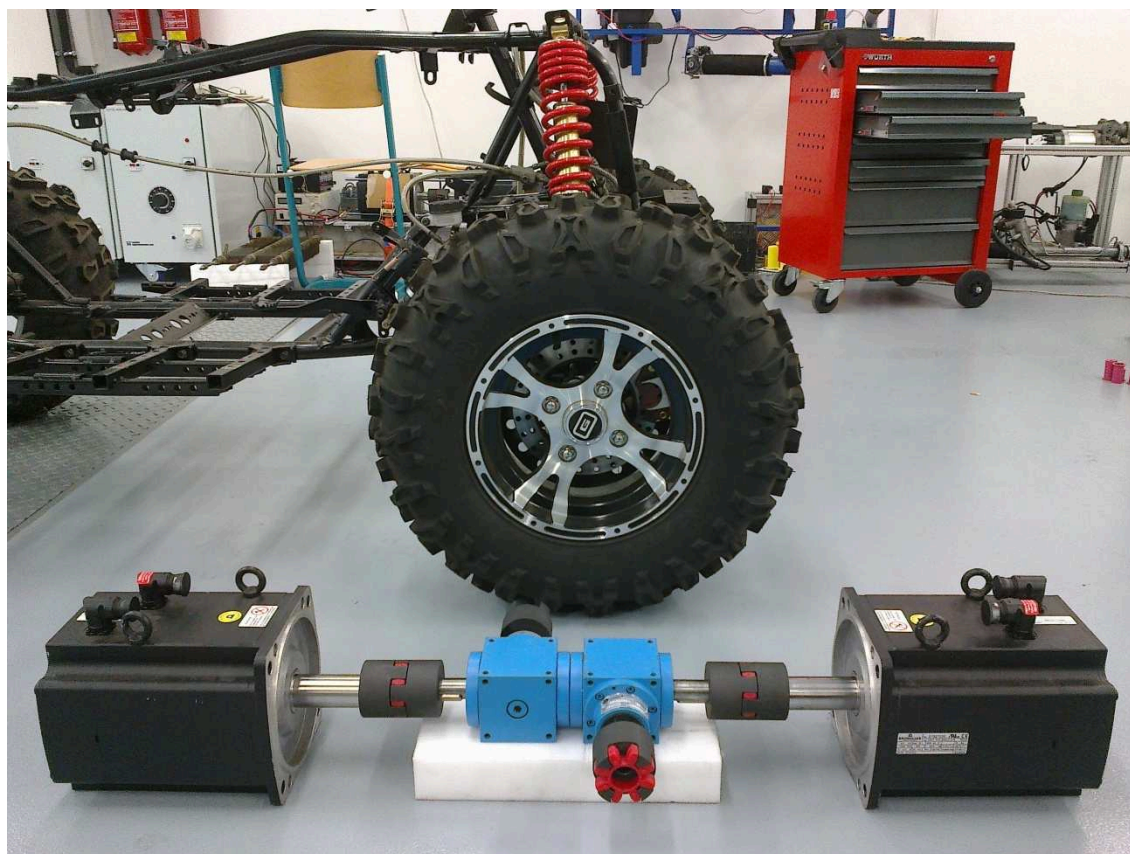
Typ	Bez otvoru		Dokončený ¹³ otvor d		Rozměry [mm]											Hmotnost [kg]			J ¹² [kg] cm ²
					Standardní verze														
	A	B	d max.	d1 max.	C	D	E ¹¹	F	M	M1	N	R	S	L	Pružný článek	Náboj A	Náboj B	Náboje A+B	
GE-T 19A-24B'			19	24	25	40	16	18	30	40	12	19	2	66	0,004	0,18	0,25	0,8	
GE-T 24A-32B			24	32	30	55	18	27	40	55	14	24	2	78	0,014	0,36	0,55	3	
GE-T 28A-38B			28	38	35	65	20	30	48	65	15	27,5	2,5	90	0,025	0,60	0,85	7	
GE-T 38A-45B			38	45	45	80	24	38	66	78	18	36,5	3	114	0,042	1,35	1,65	20	
GE-T 42A-55B			42	55	50	95	26	46	75	94	20	40	3	126	0,066	2,00	2,30	50	
GE-T 48A-60B			48	60	56	105	28	51	85	104	21	45	3,5	140	0,088	2,75	3,10	80	
GE-T 55A-70B			55	70	65	120	30	60	98	118	22	52	4	160	0,116	4,20	4,50	160	
GE-T 65A-75B			65	75	75	135	35	68	115	134	26	61	4,5	185	0,172	6,50	6,80	310	
GE-T 75A-90B			75	90	85	160	40	60	135	158	30	69	5	210	0,325	10,00	10,80	680	
GE-T 90A-100B	38	38	90	100	100	200	45	100	160	180	34	81	5,5	245	0,440	14,00	15,80	1590	

Příloha č. 6

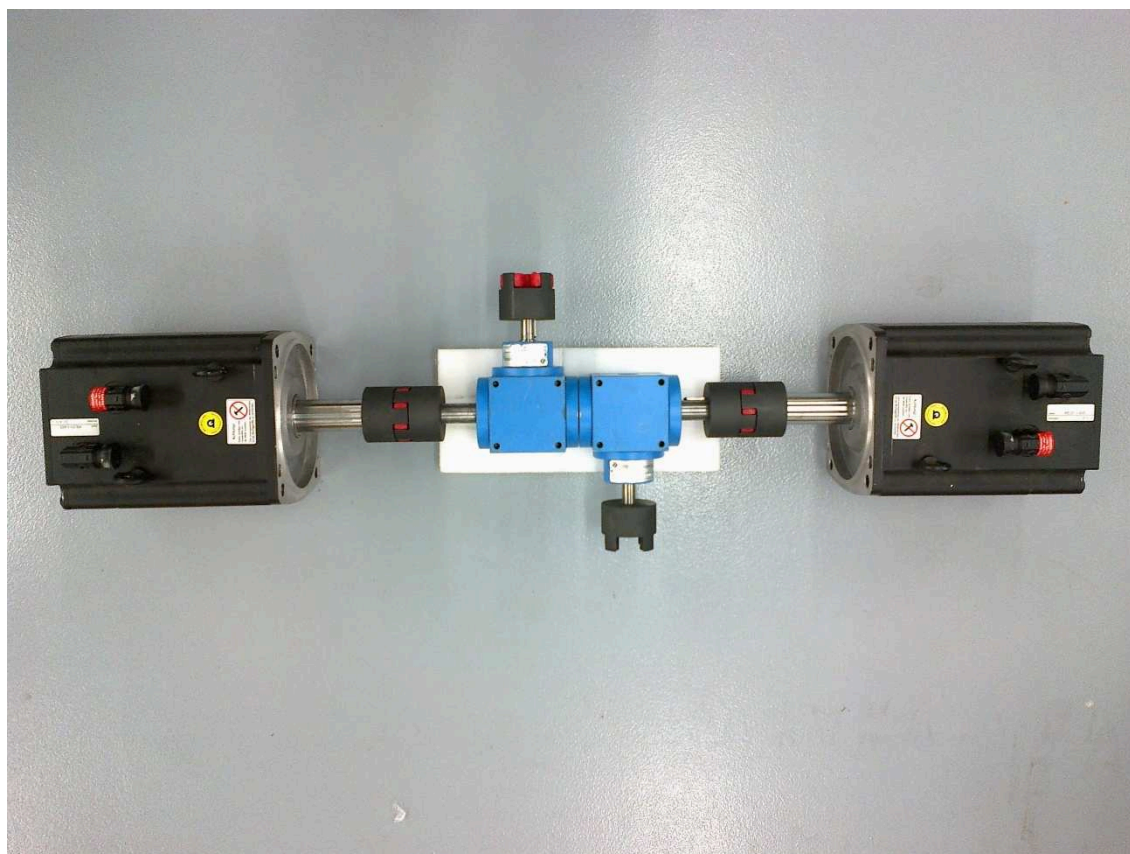


	Rozměry [mm]								
	Vel. 54	Provedení XRS*			Vel. 166	Vel. 200	Vel. 250	Vel. 350	Vel. 500
		Vel. 86	Vel. 110	Vel. 134					
A	54	86	110	134	166	200	250	350	500
A1	8,5	15	15	18	21	23	22	30	35
A2	10	10	8	9	11	11	11	15	20
A3	37	60	72	87	106	125	150	210	295
A4	44	70	90	114	144	174	216	320	450
A5	72	84	110	132	152	182	218	330	415
A6	95	114	150	182	217	267	318	450	585
A7	74	120	144	174	212	250	300	420	590
A8	122	157	205	249	300	367	443	625	835
A9	144	220	254	304	392	470	580	760	1010
B	1,5	2	2	2	2	2	3	5	10
C1 Ø f7	53	84	100	122	156	185	230	345	485
D Ø h7	11	16	20	24	32	42	55	65	120
D1 Ø H7	18	24	26	32	45	55	70	85	140
E Ø	52,8	59	68	80	107	120	152	240	320
F	M4×12	M8×20	M10×25	M10×25	M12×30	M14×35	M16×40	M20×60	M30×80
F1	M4×10	M6×12	M8×20	M8×20	M10×25	M10×25	M12×25	M12×25	M20×50
G	27	43	55	67	83	100	125	175	250
H	23	30	40	50	65	85	100	120	170
H2	35	50	55	65	90	110	140	170	210
M	4×4×20	5×5×25	6×6×35	8×7×45	10×8×60	12×8×80	16×10×90	18×11×110	32×18×150
M1	6×6×30	8×7×40	8×7×45	10×8×55	14×9×80	16×10×100	20×12×120	22×14×150	36×20×200

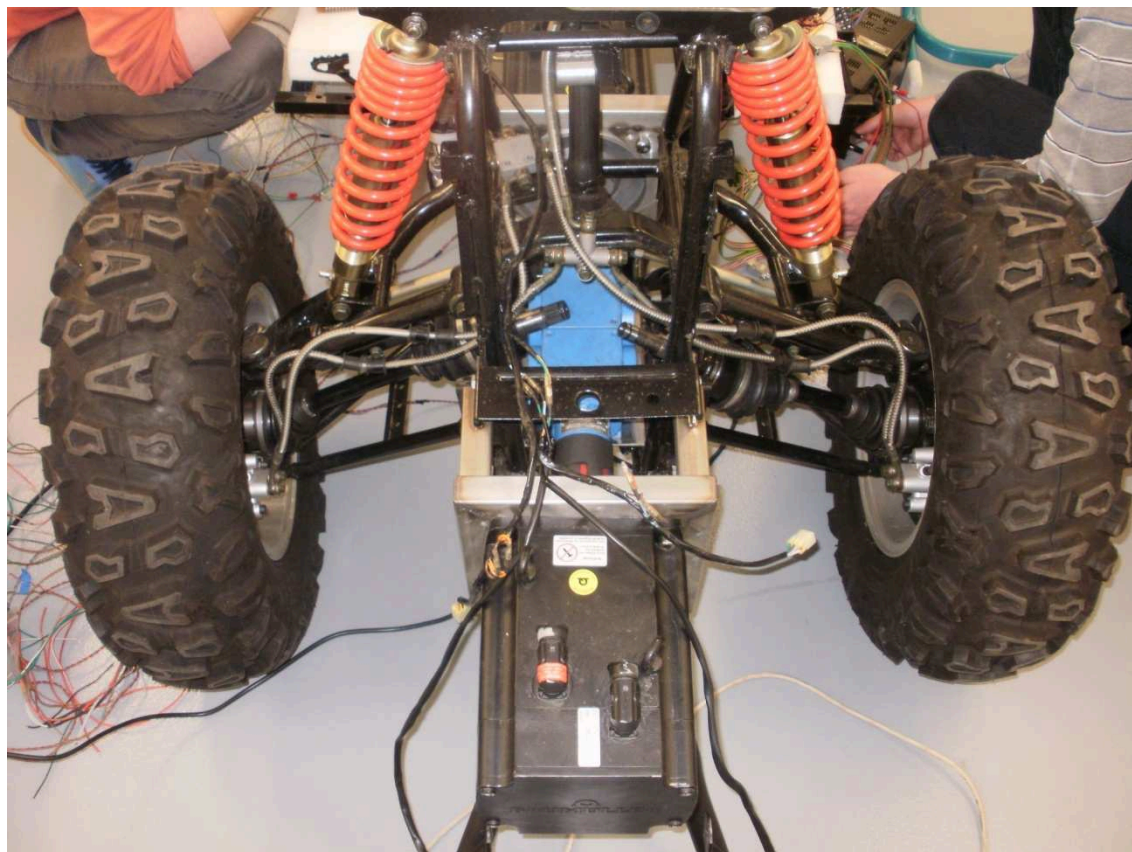
Příloha č. 7



Příloha č. 8



Příloha č. 9



Příloha č. 10

